UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"PLAN DE EXPLOTACIÓN TECNOLÓGICA DE LA BANDA DE 10 GHz EN ECUADOR"

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

Línea de investigación: Innovación Tecnológica y de productos

AUTOR:

YACELGA PUPIALES YULLI CAROLINA

DIRECTOR:

MSC. CARLOS ALBERTO VÁSQUEZ AYALA.

Ibarra, Ecuador, 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	YACELGA PUPIALES YULLI CAROLINA

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"PLAN DE EXPLOTACIÓN TECNOLÓGICA DE LA BANDA DE 10 GHZ EN ECUADOR"
AUTOR (ES):	YACELGA PUPIALES YULLI CAROLINA
FECHA: DD/MM/AAAA	04/09/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** □ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
DIRECTOR /ASESOR:	MSC.CARLOS ALBERTO VÁSQUEZ AYALA. MSC.EDGAR ALBERTO MAYA OLALLA

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 04 días del mes de septiembre de 2026

EL AUTOR:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
YULLI CAROLINA
YACELGA PUPIALES

.....

Nombre: Yacelga Pupiales Yulli Carolina

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 04 de septiembre de 2026

MSC. CARLOS ALBERTO VÁSQUEZ AYALA.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
CARLOS ALBERTO
VASQUEZ AYALA

f) ……

MSC. CARLOS ALBERTO VÁSQUEZ AYALA.

C.C.:1002424982



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen de las Lajas, por nunca dejarme sola y acompañarme en cada paso de este camino.

A mi madre, por su amor y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

A David, por ser mi soporte y compañero.

Yacelga Pupiales Yulli Carolina



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

AGRADECIMIENTO

A Dios y a la Virgen de las Lajas, por derramar sus bendiciones sobre mi vida y permitirme cumplir esta meta tan anhelada.

A mi mami, mi principal motivación por su apoyo incondicional en cada etapa de este camino.

A la Universidad Técnica del Norte, que por medio de sus docentes me permitió adquirir valiosos conocimientos a lo largo de mi formación.

Al MSc. Carlos Vásquez, director del presente proyecto, por su paciencia, compromiso y guía constante a lo largo de este proceso.

Al MSc. Edgar Maya, asesor del presente proyecto, por su tiempo y dedicación.

Al Ing. Jaime Michelena, por su participación como docente en la materia que impulsó y encaminó el presente proyecto.

A David, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles de este proceso.

Yacelga Pupiales Yulli Carolina

RESUMEN

Esta investigación analiza la viabilidad técnica y regulatoria de la banda de 10 GHz para el desarrollo de tecnología de radar Doppler en Ecuador. La metodología aplicada fue documental, descriptiva y comparativa, mediante la revisión de normativa nacional e internacional (UIT-R, FCC, ETSI, ARCOTEL), documentación técnica de equipos comerciales y experiencias internacionales de radares. La tecnología UWB se incorporó únicamente como referencia comparativa dentro del marco teórico, dado que, si bien está habilitada hasta 10.6 GHz, su desarrollo comercial no opera efectivamente en dicha frecuencia.

Se caracterizaron las condiciones técnicas de la banda propagación, pérdidas en espacio libre, comportamiento LOS/NLOS y factores geográficos y climáticos del Ecuador, y se validó el funcionamiento del sensor HB100 mediante simulación en MATLAB. Complementariamente, se desarrolló una segunda simulación de un radar marítimo en banda X (10 GHz) con detección CFAR sobre clutter de mar, que amplía el análisis hacia escenarios de vigilancia de mayor escala. A partir de estos resultados, se desarrolló un plan de explotación tecnológica que toma como referencia la normativa internacional de la FCC en cuanto a parámetros de EIRP y límites de emisión, proponiendo escenarios de aplicación en monitoreo industrial, seguridad y detección de presencia, e investigación académica.

Palabras clave: banda de 10 GHz, espectro radioeléctrico, UWB, radar Doppler, explotación tecnológica, planificación espectral.

ABSTRACT

This research analyzes the technical and regulatory feasibility of the 10 GHz band for the development of Doppler radar technology in Ecuador. The methodology applied was documentary, descriptive, and comparative, based on a review of national and international regulations (ITU-R, FCC, ETSI, ARCOTEL), technical documentation of commercial equipment, and international radar case studies. Ultra-Wideband (UWB) technology was incorporated solely as a comparative reference within the theoretical framework, given that, although it is authorized up to 10.6 GHz, its commercial development does not effectively operate within that frequency.

The technical conditions of the band were characterized, including propagation, free-space path loss, LOS/NLOS behavior, and the geographic and climatic factors of Ecuador, and the performance of the HB100 sensor was validated through a MATLAB simulation. Additionally, a second simulation of a maritime radar operating in the X-band (10 GHz) with CFAR detection over sea clutter was developed, extending the analysis toward larger-scale surveillance scenarios. Based on these results, a technology exploitation plan was developed, taking as reference the FCC's international regulations regarding EIRP parameters and emission limits, proposing application scenarios in industrial monitoring, security and presence detection, and academic research.

Keywords: 10 GHz band, radio spectrum, UWB, Doppler radar, technology exploitation, spectrum planning.

LISTADO DE SIGLAS

ARCOTEL. Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones

CFR. Código de Regulaciones Federales de los Estados Unidos (Code of Federal Regulations)

CMR-27. Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones del año 2027

ECA. Tabla Europea de Atribución Común (European Common Allocation)

ECO. Oficina Europea de Comunicaciones de la CEPT (European Communications Office)

EIRP. Potencia isotrópica radiada equivalente (Equivalent Isotropically Radiated Power)

ERC. Comité Europeo de Radiocomunicaciones (European Radiocommunications Committee)

ETSI. Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (European Telecommunications Standards Institute)

FCC. Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos (Federal Communications Commission)

IEEE. Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

INEC. Instituto Nacional de Estadística y Censos

ITU-R. Denominación en inglés del Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector)

MIIT. Ministerio de Industria y Tecnologías de la Información de China (Ministry of Industry and Information Technology)

LISTA DE CONTENIDOS

1. Capítulo I: Antecedentes 16
1.1 Tema 16
1.2 Problema 16
1.3 Objetivos 18
1.3.1. Objetivo General 18
1.3.2. Objetivos Específicos 18
1.4 Alcance 19
1.5 Justificación 21
2. Capítulo II: Marco Teórico 23
2.1 Fundamentos y gestión del espectro radioeléctrico 23
2.1.1 Definición y clasificación del espectro 23
2.1.2 Asignación de la banda de 10 GHz a nivel Internacional 26
2.1.3 Asignación de la banda de 10 GHz a nivel nacional 35
2.2 Evaluación técnica de la banda de 10 GHz 37
2.2.1. Características técnicas generales de la banda de 10 Ghz 38
2.2.2. Modelos de propagación 39
2.3 Equipos disponibles y requisitos de instalación 42
2.3.1. Equipos disponibles en la tecnología Doopler 42
2.3.2. Equipos disponibles en la tecnología UWB 43
2.3.3. Requisitos de instalación para los sistemas Doppler 44
2.3.4. Requisitos de instalación para los sistemas UWB 47
2.4 Tecnologías aplicables en la banda de 10 GHz 50
2.4.1. Aplicaciones de detección y radiolocalización 50
2.4.2. Tecnología UWB 54
2.4.3. Radar de defensa y seguridad perimetral. 58
2.5 Experiencias internacionales y casos de estudio 58
2.5.1. Alemania - Radar de defensa y seguridad perimetral 59

2.5.2. Estados Unidos - Radar de navegación y vigilancia naval 60
2.5.3. India - Sensor de detección de personas a través de paredes 61

3. Capítulo III: Análisis del Contexto Nacional y Condiciones Técnicas de la Banda de 10 GHz en Ecuador 63

3.1 Metodología aplicada para el análisis técnico y operativo 63

3.2 Diagnóstico del contexto nacional de telecomunicaciones 65
3.2.1 Infraestructura de redes y capacidades tecnológicas del país 66
3.2.2 Ecosistema de innovación y desarrollo tecnológico 67

3.3 Condiciones técnicas y ambientales de la banda de 10 GHz en Ecuador 68
3.3.1 Factores geográficos y climáticos que afectan la propagación 69
3.3.2 Parámetros operativos: pérdidas, cobertura y consumo energético 69

3.4 Funcionamiento del dispositivo HB100 en un radar efecto Doppler 73
3.4.1 Simulación en MATLAB y análisis de resultados 75
3.4.2 Interoperabilidad, coexistencia e integración tecnológica 84

3.5 Funcionamiento del radar de vigilancia marítima con detección CFAR 85

3.6 Evaluación comparativa y análisis de viabilidad nacional 88
3.6.1 Comparación técnica y operativa entre UWB y radar Doppler 89
3.6.2 Análisis de viabilidad técnica, económica y regulatoria 91
3.6.3 Resultados del diagnóstico técnico y operativo 94

3.7 Síntesis técnica del análisis realizado 98

4 Capítulo IV: Plan de Explotación Tecnológica de la banda de 10 GHz 100

4.1 Marco de Gestión y Títulos Habilitantes 100
4.1.1 Clasificación del servicio: Servicios de Valor Agregado (SVA) y Redes Privadas 101
4.1.2 Determinación del título Habilitante según la normativa de la ARCOTEL 103
4.1.3 Requisitos y procedimientos para la homologación de equipos de la banda X 105

4.2 Adopción de la Normativa de la FCC sobre Frecuencia Fundamental y Límites de Emisión para la Banda de 10 GHz 108
4.2.1 Segmentación propuesta para aplicaciones dentro de la banda de 10GHz 109
4.2.2 Especificaciones de potencia radiada (EIRP) y límites de emisión 112

4.3 Estrategias de Coexistencia Espectral 114

4.3.1 Análisis de interferencias con servicios fijos y satelitales existentes 115
4.3.2 Mecanismos de mitigación: Control de potencia y densidad espectral 117
4.3.3 Criterios de protección para servicios existentes en la banda de 10 GHz 119
4.4 Arquitectura de Implementación Lógica 121
4.4.1 Flujo de datos y gestión dentro de la arquitectura propuesta 122
4.4.2 Protocolos de comunicación sugeridos para entornos industriales 124
4.5 Aplicaciones Prácticas y Escenarios de Despliegue 126
4.5.1 Estado Industrial: Monitoreo y logística en el sector manufacturero 128
4.5.2 Escenario de Seguridad: Detección de presencia y perímetros inteligentes 130
4.5.3 Entornos académicos para investigación y validación tecnológica 133
4.6 Viabilidad y Alineación con el Desarrollo Tecnológico Nacional 134
4.6.1 Evaluación técnica de la sostenibilidad del plan 135
4.6.2 Alineación con la Política Pública de Transformación Digital y los lineamientos estratégicos del MINTEL 137
4.7 Síntesis Técnica del Plan de Explotación Propuesto 141
5 Conclusiones 143
6 Recomendaciones 145
7 Bibliografía 147
8 Anexos 156
8.1 Fundamentos de Ingeniería 156
8.2 Codigo empleado para simulación de detección de velocidad con el módulo HB100 158
8.3 Codigo empleado para simulación de vigilancia y detección de objetivos con el dispositivo Safran Series 10 LPI CSR 162

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Distribución convencional del espectro radioeléctrico. 25

Tabla 2. Tabla técnica – descriptiva de la banda de 10 GHz..... 38

Tabla 3. Tabla operativa – funcional de la banda de 10 GHz 72

Tabla 4. Resultados del desempeño del radar HB100 en simulación 83

Tabla 5 Parámetros usados para la simulación 88

Tabla 6. Comparación técnica y operativa entre UWB y radar Doppler en la banda de 10 GHz 89

Tabla 7. Checklist de viabilidad para la explotación de la banda de 10 GHz en Ecuador..... 95

Tabla 8 Autoridades y competencias..... 103

Tabla 9 Casos de uso y sus principales servicios..... 104

Tabla 10 Equipos disponibles para operar en la banda de 10 GHz..... 107

Tabla 11. Resumen de protocolos que podrían integrarse dentro de la arquitectura propuesta . 125

Tabla 12. Ejemplos de aplicaciones dentro el entorno industrial..... 129

Tabla 13. Escenarios de seguridad propuestos..... 131

Tabla 14. Posibles aplicaciones de la banda de 10 GHz en entornos académicos..... 133

Tabla 15. Factores que influyen directamente en la sostenibilidad técnica de la propuesta..... 136

Tabla 16 Cálculo del del espacio libre a 10 GHz..... 156

Tabla 17 Cálculo de la zona fresnel 157

Tabla 18 Cálculo de la ganancia para una antena parabólica..... 158

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Árbol de problemas 18

Figura 2 Diagrama de bloques para el proceso del Plan de explotación de la banda de 10GHz. 20

Figura 3 División global del espectro por regiones. 24

Figura 4 Asignación internacional de la banda de 10–10,7 GHz..... 27

Figura 5 Atribución de servicios en la banda 10–10.7 GHz para Estados Unidos (Región 2, Tabla Federal y Tabla No-Federal) 28

Figura 6 Tabla Europea de Atribución de Frecuencias y Aplicaciones (ECA) para el segmento 10,000–10,450 MHz 29

Figura 7 Tabla ECA para el segmento 10,450–10,600 MHz 31

Figura 8 Tabla ECA para el segmento 10.6–10.95 GHz..... 32

Figura 9 Tabla ECA para el segmento 10.95–11.2 GHz..... 33

Figura 10 Cuadro de asignación de frecuencias para la banda de 10 GHz en la República Popular China, comparado con la Región 3 de la UIT (segmento 10–10.68 GHz) 34

Figura 11 Cuadro de asignación de frecuencias para la banda de 10 GHz en la República Popular China, comparado con la Región 3 de la UIT (segmento 10.68–11.2 GHz) 35

Figura 12 Asignación internacional de la banda de 10–10,7 GHz en Ecuador..... 37

Figura 13 Módulo radar Doppler HB100..... 42

Figura 14 Módulo transceptor Doppler de banda X MDU1750 43

Figura 15 Módulo transceptor UWB DWM1000.Nota. Adaptado de (Octopart, 2026)..... 43

Figura 16 Módulo lector UWB Dart Vision Reader (UWD-1000)..... 44

Figura 17 Esquema del efecto doppler..... 51

Figura 18 Canalización de la capa física HRP UWB..... 56

Figura 19 Radar SPEXER 2000 3D MkIII de Hensoldt AG, instalado sobre vehículo blindado para defensa aérea terrestre..... 59

Figura 20 Radar naval AN/SPS-55 instalado en un mástil de buque de la Armada de los Estados Unidos..... 60

Figura 21. Zonas climáticas en Ecuador..... 67

Figura 22. Ilustración de la línea de vista entre dos puntos de comunicación..... 71

Figura 23. Esquema de funcionamiento de un radar Doppler para detección de movimiento 74

Figura 24. Pérdida de trayectoria y potencia recibida a lo largo de la trayectoria del vehículo. . 75

Figura 25. Comparación de potencia recibida frente al modelo de espacio libre y factor de multitrayecto. 76

Figura 26. Efecto del patrón de radiación de la antena y recuento de rayos significativos 77

Figura 27. Evolución temporal de la frecuencia Doppler durante el paso del vehículo. 79

Figura 28. Distribución del error y lecturas del estimador en 100 pruebas Monte Carlo. 80

Figura 29. Error cuadrático medio (RMSE) y porcentaje de detección en función de la velocidad real..... 81

Figura 30. Porcentaje de resolución exitosa para dos vehículos simultáneos según el tiempo de separación. 82

Figura 31. Resultados principales obtenidos en la simulación del sensor HB100..... 82

Figura 32 Segmentación propuesta para aplicaciones con sensores de perturbaciones de campo 111

Figura 33. Esquema referencial de coexistencia espectral dentro de la banda de 10 GHz.....116

Figura 34. Relación entre potencia radiada y riesgo de interferencia.....118

Figura 35. Criterios básicos de protección espectral en la banda de 10 GHz..... 120

Figura 36. Flujo lógico de datos dentro de la arquitectura propuesta..... 122

Figura 37. Flujo operativo de datos dentro del sistema 123

Figura 38. Integración de protocolos 126

Figura 39. Escenarios de aplicación propuestos para la banda de 10GHz..... 127

Figura 40. Escenario referencial de seguridad..... 131

Figura 41. Oportunidades y problemáticas relacionadas con la transformación digital en Ecuador 138

Figura 42 Matriz de metas e indicadores del eje de Tecnologías emergentes para el desarrollo sostenible..... 140

1. Capítulo I: Antecedentes

1.1 Tema

PLAN DE EXPLOTACIÓN TECNOLÓGICA DE LA BANDA DE 10 GHZ EN ECUADOR

1.2 Problema

El Plan Nacional de Frecuencias (PNF) de Ecuador, publicado en 2021 por la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), asigna a la banda de 10 GHz a los servicios de radiolocalización, fijo y móvil a título primario, mientras que los servicios de exploración por satélite y aficionados están catalogados a título secundario. Sin embargo, el PNF no indica detalles sobre asignaciones específicas, licencias activas ni autorizaciones otorgadas dentro de esta franja de frecuencia, lo que sugiere que su uso es muy limitado en la práctica (ARCOTEL, 2021a).

A nivel regional, existe evidencia de que la banda de 10 GHz mantiene relevancia para la planificación del espectro en países vecinos, aunque orientada a usos distintos a los que plantea esta investigación. En Colombia, la Agencia Nacional del Espectro (ANE) identificó en 2024 un total de 500 MHz disponibles dentro de la banda de 10–10,5 GHz como parte de su ejercicio de planificación de espectro para Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT), al tiempo que señaló que dicha banda "actualmente presenta ocupación de enlaces fijos microondas" en el país (Catalano, 2025). Este antecedente confirma que la banda de 10 GHz no es un recurso inerte a nivel regional, sino que cuenta con aplicaciones vigentes basadas en tecnologías de enlace punto a punto. Sin embargo, evidencia también que su aprovechamiento en la región se ha concentrado en usos tradicionales de transporte de datos, sin extenderse hacia tecnologías emergentes de corto alcance como UWB o radar Doppler, que constituyen el objeto de esta investigación y que cuentan

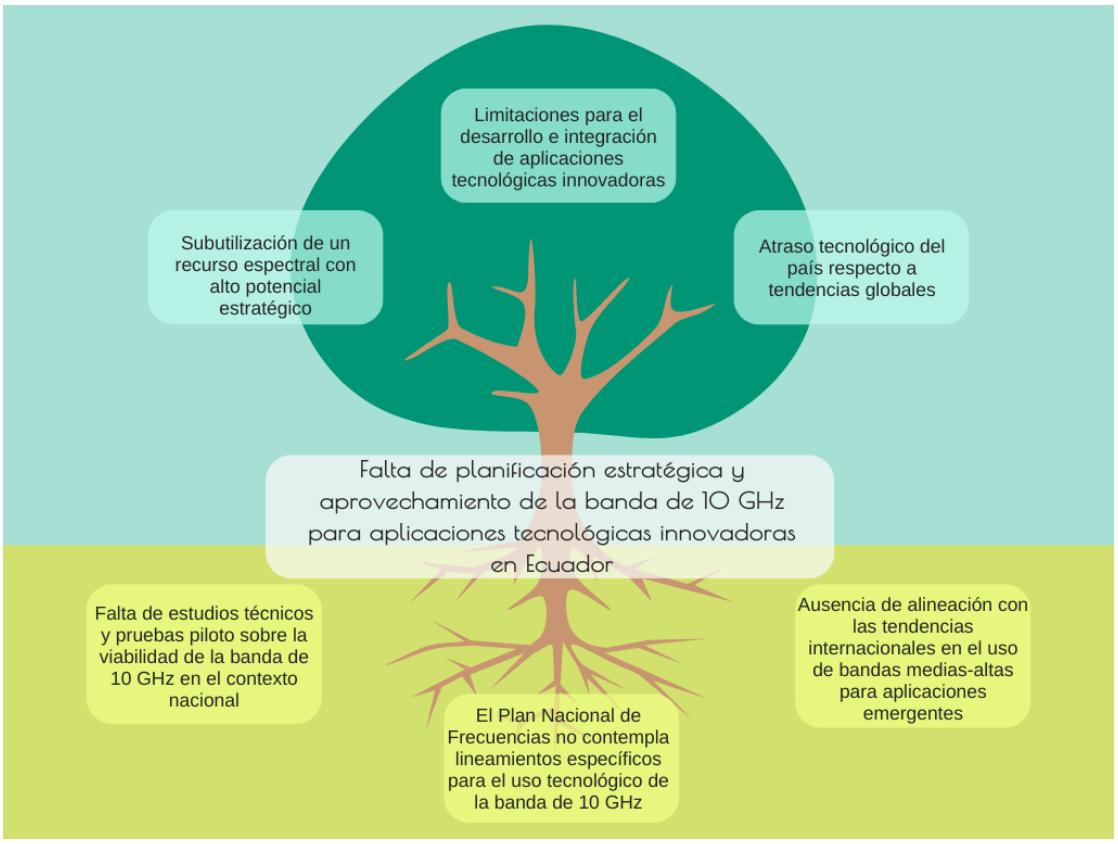
con marcos regulatorios consolidados en otras regiones del mundo desde hace más de dos décadas (FCC, 2002).

Aunque la banda de 10 GHz no constituye aún un recurso escaso en Ecuador, esto no exime la necesidad de planificarla: el Informe UIT-R SM.2093-4 señala que, incluso en países sin escasez de espectro, debe priorizarse la preparación de planes de frecuencias por su importancia para el desarrollo de las radiocomunicaciones a largo plazo (UIT, 2021). Por ello, la ausencia de un plan de explotación tecnológica para esta banda representa una oportunidad más que una limitación: es el momento idóneo para orientarla hacia tecnologías emergentes de corto alcance, como UWB y radar Doppler, antes de que se ocupe con servicios tradicionales sin planificación previa.

En la **Figura 1** se presenta un árbol de problemas que indica la relación causa-efecto asociada al aprovechamiento a la banda de 10 GHz en Ecuador.

Figura 1

Árbol de problemas



Nota. Autoría propia. El diagrama representa un árbol conceptual que ilustra la relación de causa–efecto para la banda de 10 GHz en Ecuador.

1.3 Objetivos

1.3.1. *Objetivo General*

Desarrollar un plan de explotación que oriente cómo Ecuador puede aprovechar el desarrollo de tecnologías innovadoras en la banda de 10GHz.

1.3.2. *Objetivos Específicos*

- Recopilar información sobre el uso internacional de la banda de 10 GHz y las tecnologías asociadas, para evaluar su potencial y aplicaciones en el contexto ecuatoriano.

- Identificar las necesidades técnicas y operativas para aprovechar y explotar tecnologías innovadoras en la banda de 10GHz.
- Elaborar un plan de explotación para la banda de 10 GHz en Ecuador, orientado a su aprovechamiento tecnológico según las condiciones del país y las tendencias globales.
- Formular recomendaciones técnicas que orienten una posible implementación de tecnologías innovadoras en la banda de 10 GHz en el marco de la planificación nacional del espectro.

1.4 Alcance

El presente estudio indica viabilidad técnica y estratégica de la banda de 10 GHz desarrollado en las siguientes fases.

La primera fase inicia con la recopilación y revisión de información técnica de documentos internacionales relevantes, tales como el Radio Regulations y las recomendaciones de la UIT-R, la Agenda de la CMR-27 y el Informe de Visión IMT-2030. También, publicaciones técnicas y documentos emitidos por organismos regulatorios nacionales e internacionales, con el objetivo de verificar tendencias globales con respecto al uso del espectro radioeléctrico, especialmente en la de 10 GHz. En este contexto se analizan tecnologías que operan en este rango, específicamente sistemas de detección y sensado mediante radar Doppler.

La segunda fase, aborda un análisis del contexto nacional relacionado con la capacidad del país para incorporar aplicaciones en la banda de 10 GHz con el objetivo de identificar el nivel de preparación del país tanto técnica, operativa y normativa además de sus respectivas limitaciones.

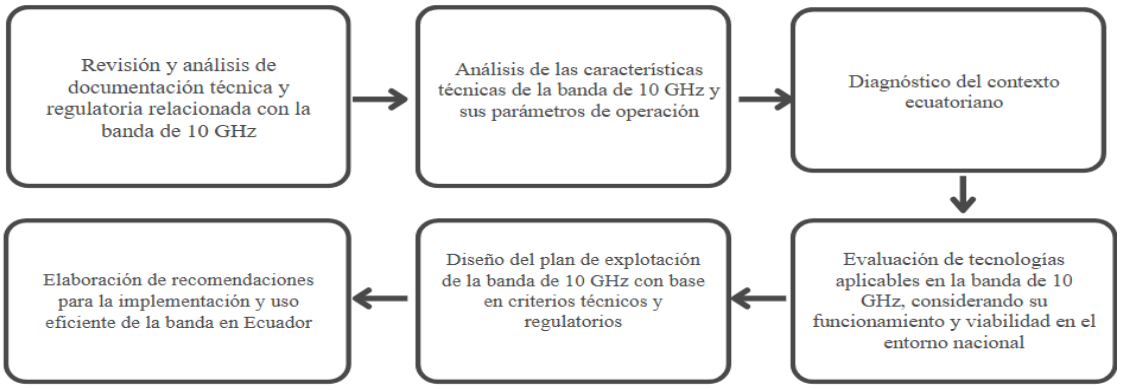
El análisis aborda temas como la propagación de la señal, el consumo energético, la topología de red, la disponibilidad de equipos y las condiciones regulatorias vigentes.

En la tercera fase, se propone un plan de explotación tecnológica para la banda de 10 GHz en donde se plantea posibles lineamientos para su uso eficiente y sostenible, ámbitos de aplicación en entornos específicos, tales como industriales, urbanos y académicos considerando la regulación internación FCC y sus recomendaciones en el control de potencia y condiciones de operación.

En la **Figura 2**, se puede visualizar un diagrama que describe la metodología propuesta para el desarrollo del Plan de Explotación Tecnológica.

Figura 2

Diagrama de bloques para el proceso del Plan de explotación de la banda de 10GHz



Nota. El diagrama muestra las fases metodológicas del proyecto, desde la revisión documental hasta la formulación de recomendaciones técnicas para el uso de la banda de 10 GHz en el país.

En la cuarta fase, se desarrollan recomendaciones técnicas para la implementación progresiva de las tecnologías analizadas las cuales podrán servir como guía para futuras iniciativas, proyectos piloto o desarrollos tecnológicos relacionados con la banda de 10 GHz.

Finalmente, se considera que el presente estudio no consta de implementaciones prácticas de una red real ni la asignación directa del espectro radioeléctrico, sino que se enfoca en desarrollar una propuesta técnica y estratégica. Asimismo, no está orientada a servicios de telecomunicaciones masivos, sino a aplicaciones especializadas de monitoreo, localización y detección en entornos controlados.

1.5 Justificación

El presente estudio se justifica por la necesidad de analizar la viabilidad técnica de emplear tecnologías de detección y monitoreo sobre la banda de 10 GHz, la cual, aunque está atribuida según el Plan Nacional de Frecuencias (PNF), no presenta asignaciones activas ni planificación nacional para nuevos usos (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, 2021). Ante esta situación, favorece evaluar la aplicabilidad de los sensores urbanos inteligentes basados en radar Doppler. Ambas representan soluciones innovadoras de corto alcance con potencial para contribuir a una gestión más eficiente y estratégica del espectro, en función de las tendencias globales y las necesidades del país (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2020).

La *Ley Orgánica de Telecomunicaciones*, reformada en 2023, define al espectro como un recurso estratégico del Estado, que debe utilizarse en beneficio del país y del interés general (Asamblea Nacional del Ecuador, 2023). Por su parte, el *Reglamento General a la Ley Orgánica de Telecomunicaciones*, actualizado mediante el Decreto Ejecutivo No. 126 en 2021, establece planificaciones técnicas con la finalidad de atender las necesidades futuras del sector (Presidencia de la República del Ecuador, 2021). En este contexto, la GSMA recomienda que los países

gestionen el espectro “con base en criterios técnicos y de demanda futura”, resaltando la importancia de realizar estudios que preparen al país para nuevas aplicaciones (GSMA, 2022).

Según (Ericsson, 2024), las bandas en el rango de 7 a 15 GHz jugarán un papel clave en la evolución de redes 5G-Advanced y 6G, al ofrecer un balance óptimo entre cobertura y capacidad para nuevos servicios al ofrecer un balance óptimo entre cobertura y capacidad para nuevos servicios.

El Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 9 de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas promueve el desarrollo de infraestructuras resilientes, la industrialización sostenible y la innovación tecnológica. En particular, la meta 9.5 propone “Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollos” (Organización de las Naciones Unidas, 2015). Esta meta aporta una investigación y análisis teórica relacionado con la banda de 10 GHz lo que contribuye al incremento de la capacidad científica y tecnológica en países en desarrollo generando innovación.

Desde esta perspectiva, el aporte de esta investigación no radica en implementar directamente infraestructura, sino en generar conocimiento clave para que el país tome decisiones fundamentadas sobre el aprovechamiento futuro del espectro, en coherencia con sus compromisos de desarrollo sostenible.

2. Capítulo II: Marco Teórico

El presente capítulo desarrolla los fundamentos teóricos necesarios para el análisis del espectro radioeléctrico y su aplicación en tecnologías inalámbricas. En primer lugar, se abordan los conceptos relacionados con la definición y clasificación del espectro, así como su organización en diferentes bandas de frecuencia. Posteriormente, se analiza la asignación de la banda de 10 GHz en el contexto internacional, considerando sus características técnicas y condiciones de uso. Finalmente, se examina la relevancia estratégica del espectro radioeléctrico en el desarrollo tecnológico, con énfasis en su potencial para la implementación de soluciones innovadoras en entornos modernos.

2.1 Fundamentos y gestión del espectro radioeléctrico

El espectro radioeléctrico constituye un recurso esencial para el funcionamiento de los sistemas de telecomunicaciones, al permitir la transmisión de información mediante ondas electromagnéticas en diferentes rangos de frecuencia. Su organización y clasificación facilitan la asignación eficiente de bandas para distintos servicios, garantizando un uso ordenado y evitando interferencias entre aplicaciones. En este contexto, el análisis de las características del espectro, así como de bandas específicas como la de 10 GHz, resulta fundamental para comprender su potencial en el desarrollo de tecnologías inalámbricas avanzadas.

2.1.1 Definición y clasificación del espectro

El Espectro Radioeléctrico es un recurso natural, de carácter limitado, que constituye un bien de dominio público, sobre el cual el Estado ejerce su soberanía. Es, asimismo, un medio intangible que puede utilizarse para la prestación de diversos servicios de

comunicaciones, de manera combinada o no con medios tangibles como cables, fibra óptica, entre otros (Ente Nacional de Comunicaciones, n.d.).

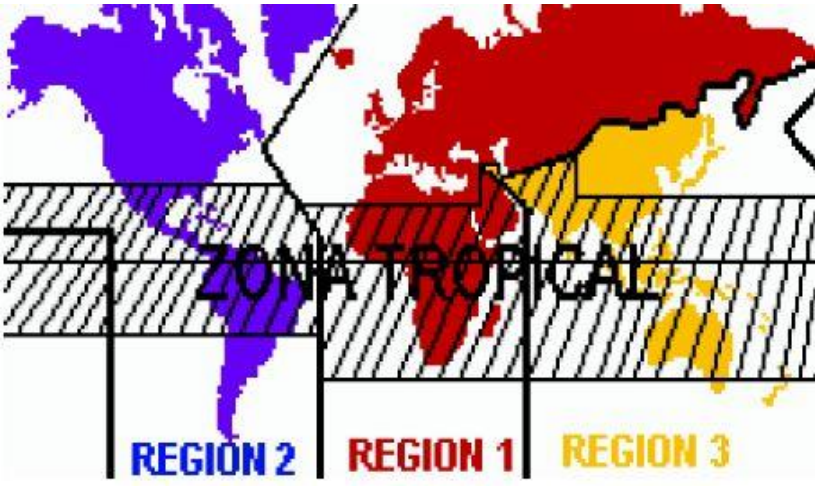
Se encuentra compuesto por varias “bandas de frecuencias” las cuales son usadas por titulares con una Licencia Única de Telecomunicaciones para la prestación de servicios de comunicaciones inalámbricas, radio fusión sonora y televisión (AM, FM y TV), internet, telefonía fija y celular.

El mundo está organizado en tres regiones lo que facilita la asignación de frecuencias según los usos comunes y los servicios de cada zona.

En la **Figura 3** se presenta la división global en el cual dentro de la región 1 se encuentra Europa, Medio Oriente, Mongolia, África y los países que conformaron la ex Unión Soviética. La región 2 está conformada por todo el continente americano mientras que la región 3 está conformada por Asia y Oceanía.

Figura 3

División global del espectro por regiones.



Nota.(Comisión Interamericana de Telecomunicaciones, 2008)

La distribución del espectro radioeléctrico se puede evidenciar en la **Tabla 1**. Dentro de la distribución del espectro radioeléctrico, las frecuencias súper altas (SHF) comprenden el

rango de 3 GHz a 30 GHz. Se caracteriza por permitir la transmisión de grandes cantidades de datos gracias a su elevando ancho de banda, sin embargo, presenta un corto alcance debido a la atenuación atmosférica por lo que emplea sistemas de alta precisión y enlaces en línea de vista. Dentro de este rango se encuentra la banda de 10 GHz la cual es relevante en aplicaciones de enlaces punto a punto de microondas, radiolocalización, radares Doppler y posteriores desarrollos experimentales.

Tabla 1

Distribución convencional del espectro radioeléctrico.

Denominación	Longitud	Frecuencia	Características	Uso típico
VERY LOW FRECUENCIES Frecuencias muy bajas	30.000 m a 10.000 m	10 KHz a 30KHz	Propagación de la onda de tierra, atenuación débil. Características estables.	Enlaces de radio a gran distancia.
LOW FRECUENCIES Frecuencias bajas	10.000 m a 1.000 m.	30 KHz a 3 MHz	Similar a la anterior, pero de características menos estables.	Enlaces de radio a gran distancia, ayuda a la navegación aérea y marítima.
MEDIUM FRECUENCIES	1.000 m a 100 m	300 KHz a 3 MHz.	Similar a la precedente, pero con una absorción elevada durante el día.	RADIOFUSIÓN
HIGH FREQUENCIES (Frecuencias altas)	100 m a 10 m	3 MHz a 30 MHz	Propagación ionosférica con variaciones estacionales y diurnas.	Comunicaciones de media y larga distancia
Very High Frequencies (Frecuencias muy altas)	10 m a 1 m	30 MHz a 300 MHz	Propagación directa, esporádica e ionosférica. Tropopropagación.	Enlaces de radio a corta distancia, televisión, frecuencia modulada (FM)

Ultra High Frequencies (Frecuencias ultra altas)	1 m a 10 cm	300 MHz a 3 GHz	Exclusivamente directa; posibilidad de enlaces por reflexión o satélites.	Enlaces de radio, radar, navegación aérea, televisión
Super High Frequencies (Frecuencias superaltas)	10 cm a 1 cm	3 GHz a 30 GHz	Propagación similar a la precedente.	Radar, enlaces de radio
Extra High Frequencies (Frecuencias extraltas)	1 cm a 1 mm	30 GHz a 300 GHz	Propagación similar a la precedente.	Aplicaciones avanzadas (rádar, comunicaciones especializadas)
Extra High Frequencies	1 mm a 0.1 mm	300 GHz a 3.000 GHz	Igual a la precedente.	Igual a la precedente

Nota. (Comisión Interamericana de Telecomunicaciones, 2008).

2.1.2 Asignación de la banda de 10 GHz a nivel Internacional

El Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT establece, en su Artículo 5, el Cuadro de atribución de bandas de frecuencias, en el que el espectro se reparte entre servicios definidos y se organiza en tres regiones (ITU-R, 2024).

Dentro de este marco, cada servicio se atribuye a título primario o secundario. Los servicios primarios, escritos en mayúsculas, tienen derecho a protección frente a interferencias; los secundarios, escritos en minúsculas, no pueden causar interferencia a los primarios ni reclamar protección de ellos. Del análisis de la **Figura 4** se desprenden los hallazgos que se resumen a continuación.

Figura 4

Asignación internacional de la banda de 10–10,7 GHz

10-10,7 GHz

Atribución a los servicios		
Región 1	**Región 2**	**Región 3**
10-10,4 EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (activo) 5.474A 5.474B 5.474C FIJO MÓVIL RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados 5.474D 5.479	**10-10,4** EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (activo) 5.474A 5.474B 5.474C RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados 5.474D 5.479 5.480 5.480A	**10-10,4** EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (activo) 5.474A 5.474B 5.474C FIJO MÓVIL RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados 5.474D 5.479
10,4-10,45 FIJO MÓVIL RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados	**10,4-10,45** RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados 5.480 5.480A	**10,4-10,45** FIJO MÓVIL RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados
10,45-10,5 RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados Aficionados por satélite 5.481	**10,45-10,5** RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados Aficionados por satélite 5.480A 5.481	**10,45-10,5** RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados Aficionados por satélite 5.481
10,5-10,55 FIJO MÓVIL Radiolocalización	**10,5-10,55** FIJO MÓVIL RADIOLOCALIZACIÓN	
10,55-10,6	FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico Radiolocalización	
10,6-10,68	EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (pasivo) FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico RADIOASTRONOMÍA INVESTIGACIÓN ESPACIAL (pasivo) Radiolocalización 5.149 5.482 5.482A	
10,68-10,7	EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (pasivo) RADIOASTRONOMÍA INVESTIGACIÓN ESPACIAL (pasivo) 5.340 5.483	

Nota. Atribuciones tomadas del Cuadro de atribución de bandas de frecuencias del Reglamento de Radiocomunicaciones, edición de 2024, Artículo 5 (UIT, 2024).

2.1.2.1 Distribución de frecuencias de la FCC

La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) es la agencia reguladora independiente encargada de administrar el espectro radioeléctrico de uso No-Federal dentro del territorio de los Estados Unidos, mientras que el uso Federal (militar y gubernamental) es administrado por la Administración Nacional de Telecomunicaciones e Información (NTIA), dependiente del

Departamento de Comercio. En la **Figura 5** se observa ambas administraciones que publican su normativa conjuntamente en la Tabla de Atribución de Frecuencias de los Estados Unidos, codificada en la sección 47 CFR § 2.106, la cual se encuentra subdividida en la Tabla Federal (columna 4) y la Tabla No-Federal (columna 5).

Figura 5

Atribución de servicios en la banda 10–10.7 GHz para Estados Unidos (Región 2, Tabla Federal y Tabla No-Federal)

10-10.4 EARTH EXPLORATION-SATELLITE (active) 5.474A 5.474B 5.474C FIXED MOBILE RADIOLOCATION Amateur 5.474D 5.479	10-10.4 EARTH EXPLORATION-SATELLITE (active) 5.474A 5.474B 5.474C RADIOLOCATION Amateur 5.474D 5.479 5.480	10-10.4 EARTH EXPLORATION-SATELLITE (active) 5.474A 5.474B 5.474C FIXED MOBILE RADIOLOCATION Amateur 5.474D 5.479	10-10.5 RADIOLOCATION US108 G32	10-10.45 Amateur Radiolocation US108 5.479 US128 NG50	Private Land Mobile (90) Amateur Radio (97)
10.4-10.45 FIXED MOBILE RADIOLOCATION Amateur	10.4-10.45 RADIOLOCATION Amateur 5.480	10.4-10.45 FIXED MOBILE RADIOLOCATION Amateur			
10.45-10.5 RADIOLOCATION Amateur Amateur-satellite 5.481			5.479 US128 US474D	10.45-10.5 Amateur Amateur-satellite Radiolocation US108 US128 NG50	
10.5-10.55 FIXED MOBILE Radiolocation	10.5-10.55 FIXED MOBILE RADIOLOCATION		10.5-10.55 RADIOLOCATION US59		Private Land Mobile (90)
10.55-10.6 FIXED MOBILE except aeronautical mobile Radiolocation			10.55-10.6	10.55-10.6 FIXED	Fixed Microwave (101)
10.6-10.68 EARTH EXPLORATION-SATELLITE (passive) FIXED MOBILE except aeronautical mobile RADIO ASTRONOMY SPACE RESEARCH (passive) Radiolocation 5.149 5.482 5.482A			10.6-10.68 EARTH EXPLORATION-SATELLITE (passive) SPACE RESEARCH (passive) US130 US131 US482	10.6-10.68 EARTH EXPLORATION-SATELLITE (passive) FIXED US482 SPACE RESEARCH (passive) US130 US131	
10.68-10.7 EARTH EXPLORATION-SATELLITE (passive) RADIO ASTRONOMY SPACE RESEARCH (passive) 5.340 5.483			10.68-10.7 EARTH EXPLORATION-SATELLITE (passive) RADIO ASTRONOMY US74 SPACE RESEARCH (passive) US131 US246		
10.7-10.95 FIXED FIXED-SATELLITE (space-to-Earth) 5.441 (Earth-to-space) 5.484 MOBILE except aeronautical mobile	10.7-10.95 FIXED FIXED-SATELLITE (space-to-Earth) 5.441 MOBILE except aeronautical mobile		10.7-11.7	10.7-11.7 FIXED FIXED-SATELLITE (space-to-Earth) 5.441 US131 US211 NG52	Satellite Communications (25) Fixed Microwave (101)
10.95-11.2 FIXED FIXED-SATELLITE (space-to-Earth) 5.484A 5.484B (Earth-to-space) 5.484	10.95-11.2 FIXED FIXED-SATELLITE (space-to-Earth) 5.484A 5.484B MOBILE except aeronautical mobile				
MOBILE except aeronautical mobile			US131 US211	NG527A	Page 48

Nota. Tomado de *Table of Frequency Allocations*, 47 CFR § 2.106 (p. 47), por (FCC, 2026b).

2.1.2.2 Normativa técnica de la ETSI para la Región 1

La **Figura 6** muestra la Tabla ECA (CEPT/ERC Report 25) para el segmento 10,000–10,450 MHz, dividida en dos bloques.

En 10,000–10,400 MHz se identifican: sistemas militares (aeronáuticos, terrestres, marítimos), Aficionados (EN 301 783), FWA (EN 302 326), Fijo (ERC/REC 12-05, EN 302 217), Radiolocalización civil y militar, radar de apertura sintética, TLPR (EN 302 372) y Video PMSE (EN 302 064). En 10,400–10,450 MHz se mantienen las mismas aplicaciones, salvo que desaparecen FWA y Fijo, y la Radiolocalización civil queda limitada a radares de baja potencia en ciertas sub-bandas. Solo cinco aplicaciones (Aficionados, FWA, Fijo, TLPR y Video PMSE) cuentan con norma técnica ETSI; las militares y el radar de apertura sintética no la requieren, por ser de uso gubernamental (ECO, 2026).

Figura 6

Tabla Europea de Atribución de Frecuencias y Aplicaciones (ECA) para el segmento 10,000–10,450 MHz

RR Region 1 Allocation and RR footnotes applicable to CEPT	*European Common Allocation and ECA Footnotes*	*Applications*	*ECC/ERC harmonisation measure*	*Standard*	*Notes*
10000 MHz - 10400 MHz					
EARTH EXPLORATION-SATELLITE (ACTIVE) (5.474A 5.474B 5.474C) FIXED MOBILE RADIOLOCATION Amateur 5.474D 5.479	EARTH EXPLORATION-SATELLITE (ACTIVE) (5.474A 5.474B 5.474C) FIXED MOBILE RADIOLOCATION Amateur 5.474D 5.479 ECA17A ECA36	Aeronautical military systems			
		Amateur		EN 301 783	Within the band 10-10.5 GHz
		FWA		EN 302 326	Including Point-to-Multipoint
		Fixed	ERC/REC 12-05	EN 302 217	
		Land military systems			
		Maritime military systems			
		Radiolocation (civil)			
		Radiolocation (military)			
		Synthetic aperture radar			
		TLPR	ERC/REC 70-03	EN 302 372	
		Video PMSE	ERC/REC 25-10	EN 302 064	Cordless Cameras; Portable video links; Temporary point-to-point video link
10400 MHz - 10450 MHz					
FIXED MOBILE RADIOLOCATION Amateur	FIXED RADIOLOCATION Amateur Mobile ECA17 ECA17A ECA36	Aeronautical military systems			
		Amateur		EN 301 783	Within the band 10-10.5 GHz
		Land military systems			
		Maritime military systems			
		Radiolocation (civil)			Low power radars in certain subbands
		Radiolocation (military)			
		TLPR	ERC/REC 70-03	EN 302 372	
		Video PMSE	ERC/REC 25-10	EN 302 064	Cordless Cameras; Portable video links; Temporary point-to-point video link

Nota. Tomado de *ERC Report 25 — The European Table of Frequency Allocations and Applications (ECA Table), por (ECO, 2026).*

La **Figura 7** muestra la Tabla ECA para el segmento 10,450–10,600 MHz, dividida en tres bloques. En 10,450–10,500 MHz se identifican: sistemas militares (aeronáuticos, terrestres, marítimos), Aficionados y Aficionados-satélite (EN 301 783, dentro de la banda 10–10.5 GHz), Radiolocalización civil y militar, TLPR (EN 302 372) y Video PMSE (EN 302 064) (ECO, 2026).

En 10,500–10,550 MHz se indican dos aplicaciones nuevas: Fijo (ERC/REC 12-05, EN 302 217/326, incluyendo punto a multipunto) y Radiodeterminación (ERC/REC 70-03, EN 300 440, dentro de la banda 10.5–10.6 GHz), manteniéndose también TLPR y Video PMSE. Desaparecen las aplicaciones militares, Aficionados y Radiolocalización civil/militar como categorías propias (ECO, 2026).

En 10,550–10,600 MHz se mantienen las mismas cuatro aplicaciones del bloque anterior (Fijo, Radiodeterminación, TLPR, Video PMSE), sin variación (ECO, 2026).

Se destaca que, a diferencia de los bloques 10–10.45 GHz analizados previamente, en este segmento el servicio Fijo aparece por primera vez con aplicación armonizada explícita, coincidiendo con el bloque donde opera el HB100, mientras que la Radiolocalización civil desaparece como aplicación individual, quedando comprendida dentro de la categoría más amplia de Radiodeterminación (ECO, 2026).

Figura 7

Tabla ECA para el segmento 10,450–10,600 MHz

RR Region 1 Allocation and RR footnotes applicable to CEPT	*European Common Allocation and ECA Footnotes*	*Applications*	*ECC/ERC harmonisation measure*	*Standard*	*Notes*
10450 MHz - 10.5 GHz					
RADIOLOCATION Amateur Amateur-satellite 5.481	FIXED MOBILE RADIOLOCATION Amateur Amateur-satellite 5.481 ECA17 ECA17A ECA23 ECA36	Aeronautical military systems			
		Amateur		EN 301 783	Within the band 10-10.5 GHz
		Amateur-satellite			
		Land military systems			
		Maritime military systems			
		Radiolocation (civil)			
		Radiolocation (military)			
		TLPR	ERC/REC 70-03	EN 302 372	
		Video PMSE	ERC/REC 25-10	EN 302 064	Cordless Cameras; Portable video links; Temporary point-to-point video link
10.5 GHz - 10.55 GHz					
FIXED MOBILE Radiolocation	FIXED MOBILE Radiolocation ECA17A	Fixed	ERC/REC 12-05	EN 302 217 EN 302 326	Including Point-to-Multipoint
		Radiodetermination applications	ERC/REC 70-03	EN 300 440	Within the band 10.5-10.6 GHz;
		TLPR	ERC/REC 70-03	EN 302 372	
		Video PMSE	ERC/REC 25-10	EN 302 064	Cordless Cameras; Portable video links; Temporary point-to-point video link
10.55 GHz - 10.6 GHz					
FIXED MOBILE EXCEPT AERONAUTICAL MOBILE Radiolocation	FIXED MOBILE EXCEPT AERONAUTICAL MOBILE Radiolocation ECA17A	Fixed	ERC/REC 12-05	EN 302 217 EN 302 326	Including Point-to-Multipoint
		Radiodetermination applications	ERC/REC 70-03	EN 300 440	Within the band 10.5-10.6 GHz,
		TLPR	ERC/REC 70-03	EN 302 372	
		Video PMSE	ERC/REC 25-10	EN 302 064	Cordless Cameras; Portable video links; Temporary point-to-point video link

Nota. Tomado de *ERC Report 25 — The European Table of Frequency Allocations and Applications (ECA Table), por (ECO, 2026).*

En la **Figura 8** se observa que, en el bloque 10.6–10.68 GHz, coexisten el servicio Fijo (ECC/DEC/(10)01, ERC/REC 12-05, incluyendo punto a multipunto), sensores pasivos satelitales para medición de emisividad superficial y precipitación, radioastronomía orientada a observaciones continuas y VLBI, y Video PMSE; en el bloque 10.68–10.7 GHz se observa que se eliminan Fijo y Video PMSE, quedando únicamente los sensores pasivos satelitales y la radioastronomía; y en el bloque 10.7–10.95 GHz se observa la aparición de aplicaciones enteramente satelitales no vistas en los bloques anteriores —AES, ESIM, ESV, FSS Earth stations, HEST, NGSO FSS y VSAT—, junto con el servicio Fijo, aquí limitado a enlaces de alta capacidad.

Figura 8

Tabla ECA para el segmento 10.6–10.95 GHz

RR Region 1 Allocation and RR footnotes applicable to CEPT	*European Common Allocation and ECA Footnotes*	*Applications*	*ECC/ERC harmonisation measure*	*Standard*	*Notes*
10.6 GHz - 10.68 GHz					
EARTH EXPLORATION-SATELLITE (PASSIVE) FIXED RADIO ASTRONOMY SPACE RESEARCH (PASSIVE) Mobile except aeronautical mobile Radiolocation 5.149 5.482 5.482A	EARTH EXPLORATION-SATELLITE (PASSIVE) FIXED RADIO ASTRONOMY SPACE RESEARCH (PASSIVE) Mobile except aeronautical mobile Radiolocation 5.149 5.482 5.482A ECA17	Fixed	ECC/DEC/(10)01 ERC/REC 12-05	EN 302 217 EN 302 326	Including Point-to-Multipoint
		Passive sensors (satellite)	ECC/DEC/(10)01		Surface emissivity and precipitation measurements
		Radio astronomy			Continuum observations, VLBI
		Video PMSE	ERC/REC 25-10	EN 302 064	Cordless Cameras; Portable video links; Temporary point-to-point video link
10.68 GHz - 10.7 GHz					
EARTH EXPLORATION-SATELLITE (PASSIVE) RADIO ASTRONOMY SPACE RESEARCH (PASSIVE) 5.340 5.483	EARTH EXPLORATION-SATELLITE (PASSIVE) RADIO ASTRONOMY SPACE RESEARCH (PASSIVE) 5.340	Passive sensors (satellite)			Surface emmissivity and precipitation measurement
		Radio astronomy			Continuum observations, VLBI
10.7 GHz - 10.95 GHz					
FIXED FIXED-SATELLITE (EARTH-TO-SPACE) (5.484) FIXED-SATELLITE (SPACE-TO-EARTH) (5.441) MOBILE EXCEPT AERONAUTICAL MOBILE	FIXED FIXED-SATELLITE (EARTH-TO-SPACE) (5.484) FIXED-SATELLITE (SPACE-TO-EARTH) (5.441) MOBILE EXCEPT AERONAUTICAL MOBILE Mobile-Satellite (space-to-Earth)	AES	ECC/DEC/(05)11 ECC/DEC/(19)04	EN 302 186	
		ESIM	ECC/DEC/(18)04 ECC/DEC/(18)05	EN 302 448 EN 302 977 EN 303 980 EN 303 981	
		ESV	ECC/DEC/(05)10	EN 302 340	
		FSS Earth stations	ERC/DEC/(00)08	EN 301 427 EN 301 430 EN 302 448	Within the band 10.7-10.95/11.2-11.45 GHz in accordance with App 30B of RR - VSAT
		Fixed	ERC/DEC/(00)08 ERC/REC 12-06	EN 302 217	Limited to high capacity fixed links
		HEST	ECC/DEC/(06)03	EN 301 428 EN 301 459	
		NGSO FSS	ECC/DEC/(17)04	EN 303 980 EN 303 981	
		VSAT	ECC/DEC/(03)04	EN 301 428	SNG

Nota. Tomado de *ERC Report 25 — The European Table of Frequency Allocations and Applications (ECA Table), por (ECO, 2026).*

En **Figura 9** se observa que, en el bloque 10.95–11.2 GHz, se mantienen las mismas aplicaciones satelitales identificadas en el bloque anterior: estaciones terrenas aeronáuticas (AES), estaciones terrenas en movimiento (ESIM), estaciones terrenas a bordo de buques (ESV), estaciones terrenas de alta densidad (HEST), servicio fijo por satélite en órbita no geoestacionaria (NGSO FSS) y terminales de apertura muy pequeña (VSAT, empleados en recolección de noticias vía satélite o SNG); además del servicio Fijo, el cual continúa normado bajo ERC/REC 12-06 y EN 302 217, limitado en este bloque específicamente a enlaces fijos de alta capacidad.

Figura 9

Tabla ECA para el segmento 10.95–11.2 GHz

RR Region 1 Allocation and RR footnotes applicable to CEPT	*European Common Allocation and ECA Footnotes*	*Applications*	*ECC/ERC harmonisation measure*	*Standard*	*Notes*
10.95 GHz - 11.2 GHz					
FIXED FIXED-SATELLITE (EARTH-TO-SPACE) (5.484) FIXED-SATELLITE (SPACE-TO-EARTH) (5.484A 5.484B) MOBILE EXCEPT AERONAUTICAL MOBILE	FIXED FIXED-SATELLITE (EARTH-TO-SPACE) (5.484) FIXED-SATELLITE (SPACE-TO-EARTH) (5.484A 5.484B) MOBILE EXCEPT AERONAUTICAL MOBILE	AES	ECC/DEC/(05)11 ECC/DEC/(19)04	EN 302 186	
		ESIM	ECC/DEC/(18)04 ECC/DEC/(18)05	EN 302 448 EN 302 977 EN 303 980 EN 303 981	
		ESV	ECC/DEC/(05)10	EN 302 340	
		Fixed	ERC/DEC/(00)08 ERC/REC 12-06	EN 302 217	Limited to high capacity fixed links
		HEST	ECC/DEC/(06)03	EN 301 428 EN 301 459	
		NGSO FSS	ECC/DEC/(17)04	EN 303 980 EN 303 981	
		VSAT	ECC/DEC/(03)04	EN 301 428	SNG

Nota. Tomado de *ERC Report 25 — The European Table of Frequency Allocations and Applications (ECA Table), por (ECO, 2026).*

2.1.2.3 Regulación para la Región 3 según la MIIT

En la **Figura 10** y **Figura 11** se observa que China continental replica en gran medida la atribución internacional de la Región 3 para el segmento de 10 a 10.68 GHz, incluyendo los mismos servicios de Exploración terrestre por satélite, Fijo, Móvil y Determinación inalámbrica de posición (equivalente a Radiolocalización), aunque con una diferencia relevante en el bloque 10–10.4 GHz, donde China continental atribuye dicho servicio con carácter secundario, mientras que la Región 3 no le asigna ese carácter de forma explícita. Se observa además que las Regiones Administrativas Especiales de Hong Kong y Macao mantienen configuraciones propias y distintas entre sí: Hong Kong subdivide el bloque 10–10.45 GHz en 10.15–10.3 GHz (exclusivamente Fijo) y 10.3–10.45 GHz ("por determinar", es decir, sin atribución definida), mientras que Macao conserva una atribución más cercana a la internacional, incluyendo el servicio de Exploración terrestre por satélite que China continental y Hong Kong omiten en ese mismo bloque (MIIT, 2022).

En el segmento 10.68–10.95 GHz se observa una diferencia notable en Hong Kong, donde se prohíbe expresamente cualquier tipo de transmisión de ondas de radio en el bloque 10.68–10.7 GHz, mientras que tanto China continental como Macao y la Región 3 mantienen ahí los servicios de Exploración terrestre por satélite, Radiolocalización e Investigación espacial. A partir del bloque 10.7 GHz, tanto China continental como la Región 3 coinciden en atribuir los servicios Fijo, Exploración por satélite y Móvil, aunque señalando en ambos casos la ausencia de asignación para servicios inalámbricos, mientras que Hong Kong y Macao amplían dicho bloque conjunto hasta 11.7 GHz, en lugar de subdividirlo en 10.95 GHz como ocurre en China continental y en la propia Región 3 (MIIT, 2022).

Figura 10

Cuadro de asignación de frecuencias para la banda de 10 GHz en la República Popular China, comparado con la Región 3 de la UIT (segmento 10–10.68 GHz)

Cuadro de asignación de frecuencias para la banda de 10 GHz

Asignación de frecuencias en la República Popular China			Asignación de frecuencias internacional
China continental	**Región Administrativa Especial de Hong Kong**	**Región Administrativa Especial de Macao**	**Región 3 de la UIT para servicios inalámbricos**
10 – 10,4 GHz Exploración terrestre por satélite (con fuente) 5.474A 5.474B 5.474C Fijo Móvil Determinación inalámbrica de posición [Secundario] 5.479 5.474D	**10,15 – 10,3 GHz** Fijo **10,3 – 10,45 GHz** Por determinar	**10 – 10,45 GHz** Exploración terrestre por satélite (con fuente) Fijo Móvil Determinación inalámbrica de posición [Secundario]	**10 – 10,4 GHz** Exploración terrestre por satélite (con fuente) 5.474A 5.474B 5.474C Fijo Móvil Determinación inalámbrica de posición [Secundario] 5.479 5.474D
10,4 – 10,45 GHz Fijo Móvil Determinación inalámbrica de posición [Secundario]	10,45 – 10,5 GHz Determinación inalámbrica de posición Fijo [Secundario] [Sólo satélite]	10,4 – 10,45 GHz Fijo Móvil Determinación inalámbrica de posición [Secundario]	10,4 – 10,45 GHz Fijo Móvil Determinación inalámbrica de posición [Secundario]
10,45 – 10,5 GHz Determinación inalámbrica de posición Fijo Móvil [Secundario] [Sólo satélite]	10,45 – 10,5 GHz Determinación inalámbrica de posición Fijo [Secundario] [Sólo satélite]	10,45 – 10,5 GHz Determinación inalámbrica de posición Fijo [Secundario] [Sólo satélite]	10,45 – 10,5 GHz Determinación inalámbrica de posición Fijo [Secundario] [Sólo satélite] 5.481
10,5 – 10,55 GHz Fijo Móvil Determinación inalámbrica de posición	10,5 – 10,68 GHz Fijo Determinación inalámbrica de posición	10,5 – 10,68 GHz Fijo	10,5 – 10,55 GHz Fijo Móvil Determinación inalámbrica de posición
10,55 – 10,6 GHz Fijo Móvil (excepto móvil aeronáutico) Determinación inalámbrica de posición			10,55 – 10,6 GHz Fijo Móvil (excepto móvil aeronáutico) [No tiene asignación inalámbrica]
10,6 – 10,68 GHz Exploración terrestre por satélite (sin fuente) Fijo Móvil (excepto móvil aeronáutico) Radiolocalización Investigación espacial (sin fuente) [Servicio inalámbrico no tiene asignación] 5.149 5.482 5.482A			10,6 – 10,68 GHz Exploración terrestre por satélite (sin fuente) Fijo Móvil (excepto móvil aeronáutico) Radiolocalización Investigación espacial (sin fuente) [Servicio inalámbrico no tiene asignación] 5.149 5.482 5.482A

Nota. Tomado a partir de la normativa nacional china de atribución de frecuencias y el Cuadro de Atribución de Bandas de Frecuencias de la UIT para la Región 3 (MIIT, 2022).

Figura 11

Cuadro de asignación de frecuencias para la banda de 10 GHz en la República Popular China, comparado con la Región 3 de la UIT (segmento 10.68–11.2 GHz)

Asignación de frecuencias inalámbricas (GHz)

Asignación de frecuencias en la República Popular de China			Asignación de frecuencias internacional Regiones 3 de la UIT
China continental	Región Administrativa Especial de Hong Kong	Región Administrativa Especial de Macao	
10,68 – 10,7 Exploración terrestre por satélite (sin fuente) Radiolocalización Investigación espacial (sin fuente) 5.340 5.483	**10,68 – 10,7** Prohibido cualquier tipo de transmisión de ondas de radio	**10,68 – 10,7** Exploración terrestre por satélite (sin fuente) Radiolocalización Investigación espacial (sin fuente)	**10,68 – 10,7** Exploración terrestre por satélite (sin fuente) Radiolocalización Investigación espacial (sin fuente) 5.340 5.483
10,7 – 10,95 Fijo Exploración por satélite (espacio-Tierra) 5.441 Móvil (excepto móvil aeronáutico) [Sin asignación inalámbrica]	**10,7 – 11,7** Fijo Exploración por satélite (espacio-Tierra)	**10,7 – 11,7** Fijo Exploración por satélite (espacio-Tierra) Móvil (excepto móvil aeronáutico)	**10,7 – 10,95** Fijo Exploración por satélite (espacio-Tierra) 5.441 Móvil (excepto móvil aeronáutico) [Sin asignación inalámbrica]
10,95 – 11,2 Fijo Exploración por satélite (espacio-Tierra) 5.484A 5.484B Móvil (excepto móvil aeronáutico) [Sin asignación inalámbrica]			**10,95 – 11,2** Fijo Exploración por satélite (espacio-Tierra) 5.484A 5.484B Móvil (excepto móvil aeronáutico) [Sin asignación inalámbrica]

Nota. Elaborado a partir de la normativa nacional china de atribución de frecuencias y el Cuadro de Atribución de Bandas de Frecuencias de la UIT para la Región 3.

2.1.3 Asignación de la banda de 10 GHz a nivel nacional

Para la banda de 10 GHz, el bloque completo va de 10 a 10.7 GHz. La UIT, a través de la Región 2, lo divide en siete sub-bloques: 10–10.4, 10.4–10.45, 10.45–10.5, 10.5–10.55, 10.55–10.6, 10.6–10.68 y 10.68–10.7 GHz. Dentro de cada sub-bloque, los servicios en letra mayúscula

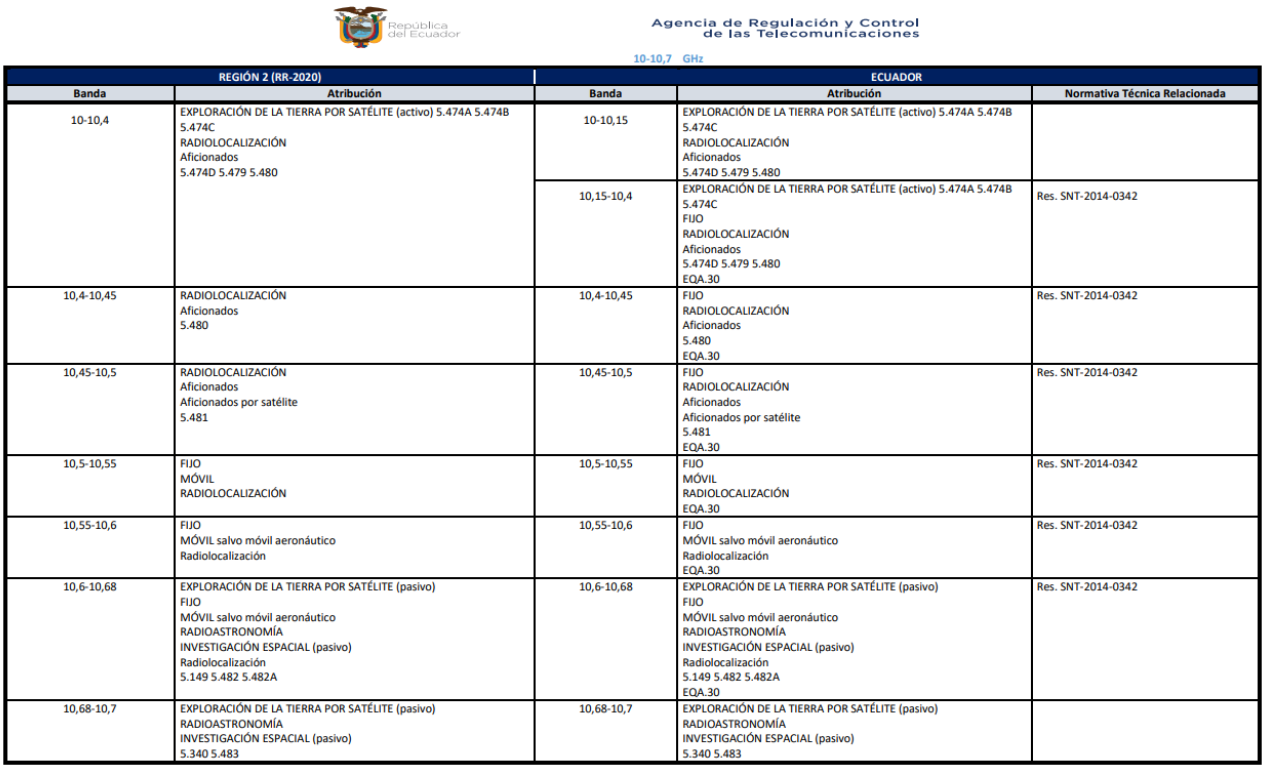
están asignados a título primario, y los servicios en minúscula a título secundario, cada uno con sus notas internacionales correspondientes.

En la **Figura 12** se muestra el caso de Ecuador, el primer sub-bloque de Región 2 (10–10.4 GHz) se subdivide en dos: 10–10.15 y 10.15–10.4 GHz. Los demás sub-bloques se mantienen idénticos entre Región 2 y Ecuador, sin subdivisión adicional.

La normativa técnica relacionada (Resolución SNT-2014-0342) fue emitida por la Secretaría Nacional de Telecomunicaciones, ente regulador previo a la creación de ARCOTEL. Dentro de este bloque no se han registrado cambios relevantes: incluso con la actualización integral del Plan Nacional de Frecuencias aprobada en 2026, la referencia normativa se mantiene igual. Las nuevas resoluciones emitidas hasta la fecha corresponden a otras bandas de frecuencia, no relacionadas con el rango de 10 GHz objeto de este estudio.

Figura 12

Asignación internacional de la banda de 10–10,7 GHz en Ecuador



República del Ecuador

Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones

10-10,7 GHz

REGIÓN 2 (RR-2020)		ECUADOR		
Banda	Atribución	Banda	Atribución	Normativa Técnica Relacionada
10-10,4	EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (activo) 5.474A 5.474B 5.474C RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados 5.474D 5.479 5.480	10-10,15	EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (activo) 5.474A 5.474B 5.474C RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados 5.474D 5.479 5.480	
		10,15-10,4	EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (activo) 5.474A 5.474B 5.474C FIJO RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados 5.474D 5.479 5.480 EQA.30	Res. SNT-2014-0342
10,4-10,45	RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados 5.480	10,4-10,45	FIJO RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados 5.480 EQA.30	Res. SNT-2014-0342
10,45-10,5	RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados Aficionados por satélite 5.481	10,45-10,5	FIJO RADIOLOCALIZACIÓN Aficionados Aficionados por satélite 5.481 EQA.30	Res. SNT-2014-0342
10,5-10,55	FIJO MÓVIL RADIOLOCALIZACIÓN	10,5-10,55	FIJO MÓVIL RADIOLOCALIZACIÓN EQA.30	Res. SNT-2014-0342
10,55-10,6	FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico Radiolocalización	10,55-10,6	FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico Radiolocalización EQA.30	Res. SNT-2014-0342
10,6-10,68	EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (pasivo) FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico RADIOASTRONOMÍA INVESTIGACIÓN ESPACIAL (pasivo) Radiolocalización 5.149 5.482 5.482A	10,6-10,68	EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (pasivo) FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico RADIOASTRONOMÍA INVESTIGACIÓN ESPACIAL (pasivo) Radiolocalización 5.149 5.482 5.482A EQA.30	Res. SNT-2014-0342
10,68-10,7	EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (pasivo) RADIOASTRONOMÍA INVESTIGACIÓN ESPACIAL (pasivo) 5.340 5.483	10,68-10,7	EXPLORACIÓN DE LA TIERRA POR SATÉLITE (pasivo) RADIOASTRONOMÍA INVESTIGACIÓN ESPACIAL (pasivo) 5.340 5.483	

Nota. Atribución de bandas de frecuencias para el segmento 10–10,7 GHz: comparación entre Región 2 (UIT) y Ecuador (ARCOTEL, 2021a).

2.2 Evaluación técnica de la banda de 10 GHz

La evaluación técnica de la banda de 10 GHz comprende el análisis de sus principales características de operación, las condiciones que influyen en la propagación de las señales y los modelos empleados para estimar las pérdidas del enlace, también se examinan los equipos disponibles y las arquitecturas de red compatibles con esta frecuencia, con la finalidad de establecer los fundamentos necesarios para valorar su cobertura, capacidad de transmisión,

comportamiento ante obstáculos y viabilidad de implementación en los escenarios considerados en la investigación.

2.2.1. *Características técnicas generales de la banda de 10 Ghz*

Desde el punto de vista técnico, la banda de 10 GHz se ubica dentro del rango de microondas, lo que le otorga propiedades particulares en cuanto a capacidad, propagación y tipo de aplicaciones posibles. No es una banda pensada para grandes coberturas, pero sí para escenarios donde se requiere mayor ancho de banda, precisión y control del enlace. Por esa razón, su uso a nivel internacional suele estar asociado a aplicaciones específicas más que a servicios masivos (Rivera et al., 2020).

Uno de los parámetros básicos para caracterizar una banda de frecuencia es la longitud de onda, ya que influye directamente en la propagación de la señal y en el diseño de las antenas.

Para comprender mejor el comportamiento de la banda de 10 GHz, en la **Tabla 2.** *Tabla técnica – descriptiva de la banda de 10 GHz* se presentan las principales características técnicas que influyen en su propagación y funcionamiento. Estos parámetros permiten entender cómo se comporta la señal frente a fenómenos como la línea de vista, la refracción atmosférica, la difracción y la atenuación provocada por las condiciones del entorno.

Tabla 2.

Tabla técnica – descriptiva de la banda de 10 GHz

Parámetro técnico	Descripción general
Frecuencia de operación	Aproximadamente entre 10 y 10,7 GHz según la atribución correspondiente
Longitud de onda	≈ 3 cm, calculada mediante $\lambda = c/f$
Región del espectro	Banda SHF (Super High Frequency)
Propagación	Predominantemente en línea de vista
Difracción	Baja capacidad para rodear obstáculos debido a su corta longitud de onda.

Refracción atmosférica	Puede modificar ligeramente la trayectoria de la señal, especialmente bajo determinadas condiciones atmosféricas
Atenuación por lluvia	Moderada a alta dependiendo de la intensidad de la precipitación
Sensibilidad a obstáculos	Alta; edificios, vegetación y relieve generan pérdidas importantes
Directividad	Permite utilizar antenas altamente direccionales.
Alcance recomendado	Mejor desempeño en enlaces de corta y media distancia

Nota. Elaboración propia a partir de (TarmaView, 2024).

2.2.2. *Modelos de propagación*

2.1.2.1 Modelo de propagación en el espacio libre UIT-R P.525

El modelo de propagación en espacio libre representa la transmisión de una señal electromagnética bajo condiciones ideales de línea de vista, sin obstáculos, reflexiones, difracción ni pérdidas por penetración, su funcionamiento considera la dispersión de la energía radiada conforme aumenta la separación entre las antenas, por lo que la pérdida básica se determina mediante la distancia y la longitud de onda, como se establece en la ecuación **(1)**, esta misma pérdida puede calcularse a partir de la distancia en kilómetros y la frecuencia en megahercios mediante la ecuación **(3)**, mientras la ecuación de transmisión de Friis, presentada en la ecuación **(3)**, relaciona la potencia transmitida con la potencia recibida, las ganancias de las antenas y la atenuación del trayecto, por esta razón las tres expresiones pertenecen al modelo de propagación en espacio libre y constituyen la referencia para analizar posteriormente las pérdidas adicionales presentes en el entorno simulado (ITU, 1994).

$$L_{\mathrm{FSPL}} = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \tag{1}$$

$$L_{\mathrm{FSPL}} = 32{,}4 + 20\log_{10}(f_{\mathrm{MHz}}) + 20\log_{10}(d_{\mathrm{km}}) \tag{2}$$

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_{FS} \quad (3)$$

2.1.2.1 Modelo de radar mono estático (ecuación de radar)

El modelo de radar monoestático describe la relación entre la potencia transmitida, las características de la antena y el blanco, y la potencia mínima detectable por el receptor, permitiendo determinar el alcance máximo del sistema. Considerando una antena que irradia con ganancia Gy una densidad de potencia incidente sobre el blanco a una distancia R, la energía reflejada depende de la sección transversal de radar del objetivo (Ab). Con esto, la potencia recibida en el radar tras el trayecto de ida y vuelta (Sangucho Simba, 2006)

$$Pr = \frac{Pt.G.Ar.Ab}{16\pi^2 R^4} \quad (4)$$

de donde se obtiene el alcance máximo detectable despejando Re igualando P_ra la sensibilidad mínima del receptor:

$$R_{max} = \sqrt{\frac{Pt.G^2\lambda^2.Ab}{Pr_{min}(4\pi)^3}} \quad (5)$$

2.2.2.3 Modelo de propagación en interiores UIT-R P.1238

El modelo de espacio libre solo es válido en condiciones de línea de vista sin obstáculos, condición que no se cumple en el escenario industrial considerado. Para entornos interiores, la Recomendación UIT-R P.1238 establece un modelo de pérdida por trayecto que incorpora el efecto

acumulado de paredes, mobiliario y estructuras metálicas mediante un coeficiente empírico de pérdida por distancia, según la ecuación (6).

$$L_total = 20\ log_{10}(f) + N\ log_{10}(d) + L_f(n) \qquad (6)$$

Donde f es la frecuencia en MHz, d la distancia en metros, N el coeficiente de pérdida por distancia según el tipo de recinto, con valores entre 22 y 33 para entornos industriales y comerciales, y L_f(n) la pérdida adicional por atravesar n pisos.

Cuando el trayecto atraviesa obstáculos identificables, la Recomendación UIT-R P.2040 permite cuantificar la atenuación de cada material en función de la frecuencia. A 10 GHz los valores de referencia empleados en este trabajo son 50 dB para estructuras metálicas, 21 dB para hormigón, 8,5 dB para madera, 5 dB para vidrio y 4 dB para tabiquería de yeso. En un radar monoestático esta pérdida se aplica dos veces, por corresponder al trayecto de ida y al de retorno.

2.2.2.4 Resolución en distancia y desplazamiento Doppler

Dos parámetros derivados del ancho de banda y de la longitud de onda determinan el desempeño de los sensores considerados. La resolución en distancia de un radar de impulsos depende únicamente del ancho de banda ocupado, como se expresa en la ecuación (7).

$$\Delta R = c / (2\ B) \qquad (7)$$

Con un ancho de banda de 1,4 GHz se obtiene $\Delta R \approx 10{,}7$ cm, valor que fija la precisión alcanzable en la localización del objetivo. De forma análoga, la frecuencia de repetición de pulsos limita la distancia máxima sin ambigüedad, $R_u = c/(2 \cdot PRF)$, que para una PRF de 40,5 MHz equivale a 3,70 m; los alcances superiores se obtienen mediante procesamiento por correlación.

Para la medición de velocidad mediante radar Doppler, el desplazamiento de frecuencia del eco respecto a la portadora se obtiene de la ecuación (8).

$$f_d = 2\ v \cos\theta / \lambda \qquad v = f_d\ \lambda / 2 \qquad (8)$$

Donde v es la velocidad radial del blanco y θ el ángulo entre su trayectoria y el eje de puntamiento del sensor. A 10 GHz cada metro por segundo de velocidad radial produce un desplazamiento de 66,7 Hz. La velocidad máxima medible sin ambigüedad es $v_{máx} = \pm\lambda \cdot PRF/4$, y la resolución de velocidad, $\Delta v = \lambda/(2 \cdot T_{obs})$, depende del tiempo de observación coherente.

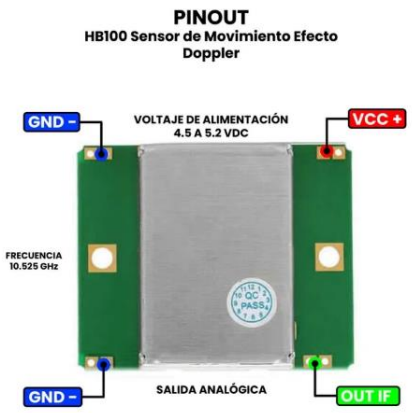
2.3 Equipos disponibles y requisitos de instalación

En esta sección se examinan los equipos disponibles para la implementación de sistemas UWB tomando en cuenta sus propios canales y radar Doppler en la banda de 10,5 GHz, considerando sus características técnicas, frecuencias de operación, métodos de medición, alcance, precisión, interfaces y aplicaciones, junto con las arquitecturas de red empleadas para integrar tags, anchors, módulos sensores y unidades de procesamiento, así como los requisitos de instalación relacionados con la ubicación, cobertura, alimentación, conectividad y correcto funcionamiento de ambas tecnologías en los escenarios propuestos.

2.3.1. *Equipos disponibles en la tecnología Doopler*

Figura 13

Módulo radar Doppler HB100.



Nota. Adaptado de (UNIT ELECTRONICS, 2026)

Modelo: HB100
Tipo de tecnología: Radar Doppler de Onda Continua (CW)
Frecuencia central: 10.525 GHz (Banda X)
Principio de operación: Variación de frecuencia por eco reflejado
Rango de detección: 5 metros a 20 metros
Potencia de salida: 15 mW
Consumo energético: 30 mA a 5 V
Aplicaciones: Sensores de presencia, automatización e IoT

Figura 14

Módulo transceptor Doppler de banda X MDU1750

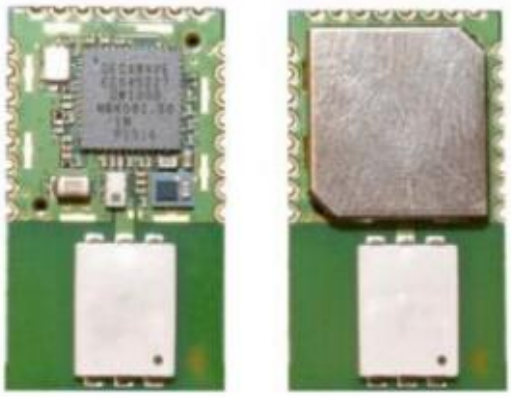


Nota. Adaptado de (Microwave Solutions Ltd, 2015)

Modelo: MDU1750-C920802
Tipo de tecnología: Radar Doppler de Onda Continua (CW) / modo pulsado
Frecuencia central: 10,525 GHz (Banda X)
Principio de operación: Variación de frecuencia por eco reflejado
Rango de detección: No especificado por el fabricante (depende de la sensibilidad del procesamiento externo que se le acople)
Potencia de salida: 10 dBm EIRP (mínimo)
Consumo energético: 40 mA típico (modo CW) a 5 V / 2 mA típico (modo pulsado)
Aplicaciones: Alarmas de intrusión, aperturas automáticas de puertas, medición de velocidad, prevención de colisiones, control de tráfico, detección de presencia

2.3.2. *Equipos disponibles en la tecnología UWB*

Figura 15



*Módulo transceptor UWB DWM1000.*Nota. Adaptado de (Octopart, 2026).

Modelo: DWM1000
Tipo de tecnología: Transceptor UWB (Ultra Wideband)
Frecuencia central: 4 bandas RF entre 3,494 GHz y 6,489 GHz (Banda C/S, IEEE 802.15.4-2011)
Principio de operación: Radio de impulsos UWB con ranging bidireccional (TWR) o diferencia de tiempo de llegada (TDOA)
Precisión de localización: Hasta 10 cm
Potencia de salida: -39 a -35 dBm/MHz (densidad espectral programable)
Consumo energético: 140 mA (transmisión) / 160 mA (recepción) a 3,3 V
Aplicaciones: Sistemas de localización en tiempo real (RTLS), redes de sensores inalámbricos (WSN)

Figura 16

Módulo lector UWB Dart Vision Reader (UWD-1000)



Nota. Adaptado de (Zebra Technologies, 2026).

Modelo: Dart Vision Reader (UWD-1000)
Tipo de tecnología: Lector/estación base UWB para sistemas de localización en tiempo real (RTLS)
Frecuencia central: 6,35 a 6,75 GHz (banda de localización, -10 dB)
Principio de operación: Recepción centralizada de señales UWB emitidas por tags, con determinación de posición por procesamiento de red
Alcance de lectura: Hasta 200 metros (versión de alta ganancia)
Consumo/capacidad: Detecta miles de tags simultáneamente
Aplicaciones: Localización en tiempo real (RTLS) de nivel industrial, redes de sensores con reconocimiento de ubicación

2.3.3. *Requisitos de instalación para los sistemas Doppler*

Una vez identificados los módulos Doppler disponibles en la banda de 10 GHz, es necesario precisar las condiciones bajo las cuales estos dispositivos pueden ser instalados y puestos en operación. A diferencia de los equipos de comunicaciones, los sensores Doppler no cuentan con interfaces de configuración ni firmware propio, por lo que su desempeño depende casi por completo de factores externos: la calidad de la alimentación eléctrica, las condiciones ambientales

del sitio, la orientación física de la antena respecto al objetivo y la cadena de acondicionamiento de señal que se conecte a la salida de frecuencia intermedia.

Requisitos de instalación para HB100

Eléctricos

- Tensión de alimentación: 4,75 a 5,25 VDC (nominal 5 V)
- Corriente de consumo: 30 mA típico, hasta 40 mA máximo
- Carga de referencia en la salida IF: 12 kΩ (las especificaciones del fabricante están medidas bajo esta condición)

Ambientales

- Temperatura de operación: -15 °C a +55 °C
- Manejo del dispositivo: sensible a descargas electrostáticas (ESD); requiere precauciones antiestáticas durante la instalación y manipulación
- Sin carcasa protectora: el módulo es una placa PCB expuesta, por lo que se debe prever protección mecánica externa si se instala en un entorno industrial o exterior

Orientación y cobertura

- Ancho de haz en azimut: 80° (a -3 dB)
- Ancho de haz en elevación: 40° (a -3 dB)
- El objetivo para detectar debe permanecer dentro de este patrón de radiación
- Evitar superficies metálicas cercanas al plano de la antena, ya que generan reflexiones espurias (multitrayecto)
- Antena de polarización lineal: la orientación física del módulo respecto al plano de movimiento del objetivo afecta la intensidad de la señal recibida

Hardware complementario requerido

- Amplificador de bajo ruido (LNA), ya que la señal en el pin IF es del orden de microvoltios
- Filtro paso-banda para aislar la componente Doppler y rechazar ruido/componente DC
- Conversor analógico-digital (ADC)
- Microcontrolador o tarjeta de adquisición de datos para procesar la señal digitalizada

Software

- No requiere firmware, driver ni configuración por software

Requisitos de instalación — MDU1750

Eléctricos

- Tensión de alimentación: +5 V ± 0,25 VDC
- Corriente de consumo: 40 mA típico, hasta 60 mA máximo en modo CW; 2 mA típico en modo pulsado (5% ciclo de trabajo)
- Ancho de pulso mínimo: 5 µs
- Ciclo de trabajo mínimo: 1%

Ambientales

- Temperatura de operación: -10 °C a +55 °C
- Temperatura de almacenamiento: -30 °C a +70 °C
- Advertencia del fabricante: el equipo funciona hasta +70 °C, pero el desempeño se degrada por encima de +55 °C
- Coeficiente de variación de potencia con temperatura: 3 dB sobre el rango de operación
- Coeficiente de variación de frecuencia con temperatura: 15 MHz sobre el rango de operación
- Carcasa plástica ligera incluida, de construcción robusta

Orientación y cobertura

- Ganancia de antena: 8 dBi (versión estándar) o 5 dBi (versión para techo)
- Ancho de haz en plano E: 72°
- Ancho de haz en plano H: 36°
- Existen dos versiones mecánicas distintas según el tipo de montaje: pared/estándar (C920802) o techo (C920810), cada una con su propio patrón de cobertura
- Debe seleccionarse la versión de montaje según la ubicación física prevista en el escenario de prueba

Requisito específico de pedido

- Debe solicitarse exactamente el código **C920802** (variante de 10,525 GHz), ya que el mismo modelo MDU1750 se fabrica en al menos 5 variantes de frecuencia distintas según el país de destino (9,35 a 10,587 GHz); un código de pedido incorrecto entregaría un dispositivo en otra frecuencia no comparable con el HB100

Hardware complementario requerido

- Igual que el HB100: amplificador de bajo ruido, filtro paso-banda, ADC y microcontrolador o tarjeta de adquisición

Software

- No requiere firmware, driver ni configuración por software

2.3.4. *Requisitos de instalación para los sistemas UWB*

En esta sección se detallan los requisitos de los dos equipos tomados como referencia, que representan dos modelos de integración opuestos: el DWM1000, un módulo transceptor que requiere un microcontrolador anfitrión y desarrollo propio, y el UWD-1000 (Zebra Dart Vision Reader), un lector comercial de configuración cerrada que se entrega listo para operar. Para cada

uno se organizan las exigencias en software y procesamiento, hardware complementario, parámetros eléctricos, condiciones ambientales, montaje, red y certificación, según las fichas técnicas de los fabricantes.

Requisitos de instalación para DWM1000

Microcontrolador y software

- El DWM1000 no trae software propio; necesita un microcontrolador externo conectado por SPI que lo controle.
- Se recomienda usar Arduino IDE como entorno de programación, junto con un microcontrolador compatible como ESP32, Arduino Uno/Nano o Raspberry Pi Pico.
- El ESP32 es la mejor opción: es económico, fácil de conseguir en Ecuador, y tiene librerías de comunidad ya disponibles para conectarlo con el DWM1000.

Hardware necesario

- Microcontrolador host (ESP32 recomendado)
- Fuente de alimentación regulada de 2,8 a 3,6 V DC
- Opcional: placa de evaluación EVB1000 del fabricante, para pruebas iniciales

Eléctricos

- Alimentación: 2,8 a 3,6 V DC
- Consumo: 140 mA en transmisión, 160 mA en la recepción

Ambientales

- Temperatura de operación: -40 °C a +85 °C
- Es sensible a descargas electrostáticas (ESD); manipular con precauciones antiestáticas

Montaje

- Dejar un espacio libre de al menos 10 mm alrededor de la antena, sin metal, tierra ni baterías cerca

Certificación

- Tiene certificación CE/ETSI para Europa
- No tiene certificación FCC confirmada

Requisitos de instalación para UWD-1000 (Zebra Dart Vision Reader)

Software

- Ya viene con firmware de fábrica, no requiere programación
- Se configura por menús, conectándose vía SSH o por cable serial RS-232

Hardware necesario

- Tags UWB Dart (el lector no funciona solo, necesita tags emparejados)
- Cable adaptador serial DB-9 a RJ-45 para configuración inicial

Eléctricos

- Alimentación por PoE (Power over Ethernet), 37 a 57 VDC

Ambientales

- Protección IP67 (resistente a agua y polvo)
- Peso: 2,6 kg

Red

- Requiere conexión Ethernet o WiFi activa todo el tiempo

Montaje

- Fijo, en techo o pared; no puede moverse una vez instalado

Certificación

- Certificado en Estados Unidos (FCC), Canadá y Europa (CE)

2.4 Tecnologías aplicables en la banda de 10 GHz

A continuación, se describen las principales aplicaciones tecnológicas identificadas dentro de la banda de 10 GHz, correspondiente a la Banda X del espectro radioeléctrico (8-12 GHz), ampliamente utilizada a nivel mundial por su equilibrio entre resolución, alcance y baja atenuación frente a condiciones climáticas adversas.

2.4.1. *Aplicaciones de detección y radiolocalización*

A continuación, se describen las principales aplicaciones tecnológicas identificadas dentro de la banda de 10 GHz, correspondiente a la Banda X del espectro radioeléctrico (8-12 GHz), ampliamente utilizada a nivel mundial por su equilibrio entre resolución, alcance y baja atenuación frente a condiciones climáticas adversas.

2.4.1.1. Radar Doppler de corto alcance.

Aplicación empleada en sistemas de detección de movimiento y control de velocidad vehicular, mediante sensores que detectan el cambio de frecuencia de una señal reflejada por un objeto en desplazamiento (efecto Doppler). Ejemplo: módulo HB100, que opera en la frecuencia central de 10.525 GHz (FCC, 2026a)

Principios generales del Efecto Doppler

El principio del funcionamiento para el efecto Doppler depende de la transmisión de una señal microondas hacia un objeto. La frecuencia de la señal reflejada cuando rebota contra un objeto cambia de acuerdo con el movimiento de este. Cuando el objeto se encuentra estático, no hay variación en la frecuencia reflejada; si se aleja, disminuye y si se acerca, aumenta.

Dependiendo de la variación se puede determinar la velocidad y la dirección del objeto en movimiento. Sin embargo, radar Doppler representa limitaciones físicas cuando se trata de medir máximo alcance y velocidad (Zhang, 2024).

Radar Doppler de Onda Continua (CW - Continuous Wave)

El efecto Doppler describe la variación de la frecuencia provocada por el desplazamiento rotativo entre transmisor y receptor. Como se observa en la **Figura 17**, un sistema de radar mono estática viene dado por la ecuación **(3)**.

$$f_R = f_o * \left(\frac{c - v_r}{c + v_r}\right) \tag{6}$$

Figura 17

Esquema del efecto doppler



Nota. Reproducido de (Martínez, 2019)

Considerando que la velocidad del objeto es menor que la de la velocidad de la luz, la ecuación **(3)** se puede apreciar como:

$$f_R \cong f_o * \left(1 - \frac{2v_r}{c}\right) = f_o - f_o \frac{2v_r}{c} = f_o - f_d \quad (7)$$

Donde v_r representa la velocidad radial y f_d la frecuencia Doppler.

Procesamiento complejo de la señal I/Q en un radar Doppler CW

Señal transmitida de un radar de onda continua emite una señal sinusoidal con frecuencia constante, tomando en cuenta que, al ser mono estático, el transmisor y el receptor se encuentran dentro del radar o la misma ubicación, o también se puede usar antenas próximas con un aislamiento prudente. La señal que se transmite es representada por la ecuación (3).

$$s_T(t) = A_T \cos(2\pi f_c t) \quad (8)$$

Donde A_T *es amplitud transmititda y* f_c es frecuencia portadora del radar y t es el tiempo.

La propagación del eco cuando la onda intercepta el receptor, una parte de la energía se refleja hasta el receptor, por lo que el eco de propagación presenta un retado de ida y vuelta. Este retardo de propagación se representa con la siguiente ecuación:

$$\tau(t) = \frac{2R(t)}{c} \quad (9)$$

Donde $R(t)$ es la separación instantánea entre el radar y objetivo y c es la velocidad de la propagación de la señal.

Desplazamiento Doppler cuando el objetivo se mueve radialmente, la fase del eco varía con el tiempo y genera una diferencia entre la frecuencia transmitida y la recibida, a lo que se

denomina frecuencia Doppler. Para un radar mono estático la velocidad racial y la frecuencia Doppler se relación como:

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \Leftrightarrow v_r = \frac{\lambda f_d}{2} \tag{10}$$

Donde $f_d$representa la frecuencia Doppler, $v_r es$ la velocidad radial, mientras que el factor 2 $indica\ el$ movimiento del recorrido de ida y vuelta de la señal

La recuperación de fase de la función de arco tangente combina ambos canales y permite seguir los cambios de fase con menor dependencia de la posición inicial del objetivo, aunque previamente deben reducirse los desplazamientos de continua y los errores de amplitud o fase entre I y Q (MathWorks, n.d.). La variación de la fase permite ver los desplazamientos relativos del objeto, mas no la distancia absoluta ya que para un radar CW emite frecuencia sin variaciones.

La fase instantánea se presenta en la ecuación (3).

$$\hat{\phi}(t) = \text{atan2}[Q(t), I(t)] \tag{11}$$

En el procesamiento digital mediante FFT**, l**a señal compleja de banda base despues de la digitalización se representa a continuación:

$$s_{IQ}[n] = I[n] + jQ[n] \tag{12}$$

La ecuación (12) se procesa empleando la Transformada Rápida de Fourier para verificar el contenido espectral.

$$S[k] = \text{fftshift}\{FTT[s_{IQ}[n]]\} \tag{13}$$

La función fftshift ubica en el centro del especto la frecuencia cero, esto ayuda a representar las frecuencias positivas y negativas de Doppler mientras que la variación producida por el movimiento del objeto se observa en el desplazamiento del pico.

La Determinación de velocidad y dirección viene dada por la velocidad radial y se representa con la siguiente ecuación:

$$v_r = \frac{\lambda f_d}{2} \tag{14}$$

En la ecuación (3) se asume que la frecuencia Doppler positiva indica acercamiento mientras que la frecuencia negativa es un alejamiento y cuando tiene valor cercano a cero es un objeto sin movimiento.

2.4.2. *Tecnología UWB*

La tecnología Ultra Wideband (UWB) se caracteriza por el uso de señales de gran ancho de banda que permiten una alta resolución temporal, lo que la convierte en una solución eficiente para aplicaciones de posicionamiento en interiores. A diferencia de otras tecnologías inalámbricas, UWB ofrece una mayor precisión en la estimación de distancias, basada en la medición del tiempo de propagación de la señal.

2.4.2.1. Banda y canalización

La Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos define el ancho de banda UWB como el intervalo comprendido entre las frecuencias f_Ly f_H, determinadas en los puntos donde la emisión radiada se encuentra 10 dBpor debajo de su valor máximo.

Para los sistemas UWB de comunicación en interiores y dispositivos portátiles, la FCC estableció en Estados Unidos el intervalo comprendido entre 3.1y 10.6 GHz. Dentro de esta banda, la canalización HRP UWB utiliza diferentes frecuencias centrales, la mayoría con un ancho nominal de 499.2 MHz (Rohde&Schwarz, 2021).

En la **Figura 18** se observa la distribución asignada por la FCC en Estados Unidos de canales en la capa física HRP UWB en donde se organiza los canales en tres grupos alrededor de 10 GHz.

Para determinar los límites nominales del canal se emplea la ecuación **(15)**:

$$f_{inf,nom} = f_c - \frac{B_{nom}}{2}, \qquad f_{sup,nom} = f_c + \frac{B_{nom}}{2} \tag{15}$$

donde:

$f_{inf,nom} =$ frecuencia inferior nominal del canal

$f_{sup,nom} =$ frecuencia superior nominal del canal

$f_c =$ frecuencia central del canal

$B_{nom} =$ ancho de banda nominal

Figura 18

Canalización de la capa física HRP UWB

Band group	Frequency range	Channel number	Center frequency (in MHz)	Bandwidth (in MHz)	Mandatory (M)/ optional (O)
0 (subGHz)	249.6 MHz to 749.6 MHz	0	499.2	499.2	M
1 (low band)	3.1 GHz to 4.8 GHz	1	3494.4	499.2	O
		2	3993.6	499.2	O
		3	4492.8	499.2	M
		4	3993.6	1331.2	O
2 (high band)	6.0 GHz to 10.6 GHz	5	6489.6	499.2	O
		6	6988.8	499.2	O
		7	6489.6	1081.6	O
		8	7488	499.2	O
		9	7987.2	499.2	M
		10	8486.4	499.2	O
		11	7987.2	1331.2	O
		12	8985.6	499.2	O
		13	9484.8	499.2	O
		14	9984	499.2	O
		15	9484.8	1354.97	O

Nota: Los anchos mostrados corresponden a los valores nominales de la canalización HRP UWB. Tomado de (Rohde&Schwarz, 2021).

La resolución de la ecuación **(15)** se detalla en el ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. , donde se presenta el desarrollo completo del cálculo para la determinación de los límites del canal.

2.4.2.2. Densidad espectral y potencia equivalente

La densidad espectral de potencia indica cómo se distribuye la potencia transmitida en función de la frecuencia. Cuando se expresa en dBm/MHz, representa la potencia correspondiente a cada megahercio de ancho de banda.

La FCC estableció para sistemas UWB interiores un límite promedio de EIRP de $-41{,}3$ dBmmedido con una resolución de 1 MHz dentro del intervalo de 3,1 a 10,6 GHz

(FCC,2022). Este valor es una referencia regulatoria estadounidense y no representa automáticamente la normativa de otros países.

Si la densidad espectral se supone uniforme, la potencia total equivalente puede estimarse mediante la ecuación **(16):**

$$P_{\text{total}} = PSD + 10\log_{10}(B_{\text{MHz}}) \quad (16)$$

donde:

- PSDse expresa en dBm/MHz;
- B_{MHz}es el ancho de banda expresado en MHz;
- P_{total}se obtiene en dBm.

2.4.2.3. Propagación multitrayecto

La propagación multitrayecto se produce cuando varias versiones de la misma señal llegan al receptor siguiendo recorridos diferentes. Cada componente puede presentar distinta amplitud, fase y retardo.

Mediciones realizadas en una nave industrial identificaron dispersión multitrayecto densa debido a la presencia de estructuras metálicas. En dicho estudio también se observaron agrupaciones de trayectorias y diferencias entre condiciones LOS y NLOS (Karedal et al., 2004).

Para una trayectoria reflejada de primer orden, la distancia total se calcula como:

$$d_{\text{ref}} = d_1 + d_2 \quad (17)$$

donde:

- $d_1$es la distancia desde el transmisor hasta el punto de reflexión;
- $d_2$es la distancia desde el punto de reflexión hasta el receptor.

La pérdida de esa trayectoria puede representarse mediante:

$$L_{\text{ref,total}} = L_{\text{FSPL}}(d_{\text{ref}}) + L_{\text{ref}} \quad (18)$$

donde L_{ref} es la pérdida adicional producida durante la reflexión.

Una representación completa del multi trayecto requeriría considerar múltiples componentes y sus respectivos retardos. Un modelo de una sola reflexión constituye únicamente una aproximación geométrica simplificada.

2.4.3. *Radar de defensa y seguridad perimetral.*

Radares de pulso Doppler de antena activa (AESA), empleados en defensa aérea terrestre, protección de convoyes y detección de drones. Los radares de defensa y seguridad perimetral que operan en la banda de 10 GHz se basan en el principio de radar de pulso Doppler, mediante el cual el equipo emite pulsos electromagnéticos de corta duración y analiza tanto el tiempo de retorno del eco reflejado (para calcular la distancia al objetivo) como el desplazamiento de frecuencia de dicho eco (efecto Doppler, para calcular la velocidad radial del objetivo). Esta tecnología incorpora además antenas activas de exploración electrónica (AESA, por sus siglas en inglés), compuestas por múltiples elementos radiantes controlados electrónicamente, lo cual permite dirigir el haz de radar sin necesidad de mover mecánicamente la antena, logrando tiempos de reacción más rápidos y la capacidad de rastrear múltiples objetivos de forma simultánea (HENSOLDT, 2022).

2.5 Experiencias internacionales y casos de estudio

El presente apartado recopila experiencias internacionales relevantes en la explotación de la banda de 10 GHz, con el propósito de identificar antecedentes tecnológicos y regulatorios que

sustenten la propuesta desarrollada en la presente investigación. Dichas experiencias se organizan según el tipo de tecnología empleada a continuación:

2.5.1. *Alemania - Radar de defensa y seguridad perimetral*

Un referente internacional en la aplicación de la banda de 10 GHz es Alemania, a través de la empresa Hensoldt AG, fabricante del radar SPEXER 2000 3D MkIII. Como se ve en la **Figura 19** se trata de un dispositivo que funciona como radar de pulso Doppler de antena activa (AESA), empleado en aplicaciones de defensa aérea terrestre, protección de convoyes y sistemas de defensa antidrones, desplegado en las Fuerzas Armadas alemanas y de países aliados de la OTAN, entre ellos Ucrania (HENSOLDT, 2022). Según declaraciones de un ingeniero de radar de la compañía a la publicación especializada en defensa EDR Magazine, este equipo opera dentro del rango de 9.2 a 10 GHz (Banda X), empleando un esquema de agilidad de frecuencia con más de 100 canales disponibles y un ancho de banda instantáneo de 15 MHz por pulso transmitido (Valpolini, 2020).

Figura 19

Radar SPEXER 2000 3D MkIII de Hensoldt AG, instalado sobre vehículo blindado para defensa aérea terrestre



Nota. Es un sistema de defensa aérea de corto alcance (Ground-Based Air Defence)

Tomando de (Valpolini, 2020)

Dado que dicho rango tiene como límite superior precisamente los 10 GHz, este equipo se encuentra técnicamente habilitado para operar en frecuencias próximas o iguales a la banda objeto de la presente investigación, aunque no exista evidencia pública que confirme cuál de los canales específicos se emplea en un despliegue operativo real. Gracias a su tecnología AESA, el sistema ofrece alta resolución y, a diferencia de los sensores ópticos, permite la detección de amenazas en condiciones de niebla, lluvia o baja visibilidad (HENSOLDT, 2022). Con ello, Alemania demuestra un caso de uso consolidado de la banda de 10 GHz para seguridad avanzada, aportando un modelo que aún no se replica en países como Ecuador.

2.5.2. *Estados Unidos - Radar de navegación y vigilancia naval*

Un caso de estudio verificado de equipo militar naval operando en el límite de la banda de 10 GHz en Estados Unidos es el radar AN/SPS-55, fabricado por Cardion Electronics como reemplazo de estado sólido del radar AN/SPS-10, operando en el rango de 9.05 a 10 GHz (Banda X), con una potencia pico de 130 kW, un alcance instrumentado de 190 km y una resolución de rango de 200 metros. El sistema emplea un transmisor de magnetrón y dos antenas de arreglo de ranuras con polarizaciones circular y lineal horizontal respectivamente, habiendo sido producidas más de 200 unidades para uso naval a nivel mundial, incluyendo su instalación documentada a bordo del USS Samuel B. Roberts de la Armada de los Estados Unidos (Wolff, 2022).

En la **Figura 20** se presenta aplicaciones asociadas a distintos rangos de frecuencia como sistemas de navegación, control aéreo, vigilancia, aplicaciones marítimas y monitoreo terrestre.

Figura 20

Radar naval AN/SPS-55 instalado en un mástil de buque de la Armada de los Estados Unidos



Nota. Tomado de (Wolff, 2022).

2.5.3. *India - Sensor de detección de personas a través de paredes*

El sistema opera bajo el principio Doppler en Banda X: el HB100 transmite señales de radiofrecuencia hacia la pared, y cuando existe movimiento humano al otro lado, la señal reflejada retorna con un corrimiento de frecuencia proporcional al desplazamiento torácico del sujeto, permitiendo inferir su existencia y posición mediante demodulación de la señal (Shirke & Iyer, 2023).

El prototipo integra el HB100 montado sobre un motor servo (controlado por un microcontrolador Atmega328), el cual rota de 0° a 120° para cubrir un área amplia de escaneo, activando un buzzer y desplegando en pantalla el ángulo de llegada de la detección. En pruebas experimentales, el sistema detectó sujetos ubicados a 40°, 80° y 110° con lecturas de 39°, 76° y 105° respectivamente, alcanzando una precisión del 95% (Shirke & Iyer, 2023).

Los autores señalan aplicaciones en rescate durante desastres naturales, monitoreo remoto de adultos mayores y pacientes en UCI, operaciones de seguridad, y ciudades inteligentes basadas en IoT. Este caso evidencia la versatilidad del HB100 para aplicaciones civiles más allá del control

de tránsito vehicular, complementando los casos de uso de defensa militar de origen chino ya analizados dentro de la Región 3.

3. Capítulo III: Análisis del Contexto Nacional y Condiciones Técnicas de la Banda de 10 GHz en Ecuador

En este capítulo se analizó el contexto nacional y las condiciones técnicas para el aprovechamiento de la banda de 10 GHz en Ecuador, mediante una metodología documental, descriptiva y comparativa orientada al estudio de la infraestructura de telecomunicaciones, las capacidades tecnológicas del país y los factores geográficos y climáticos que influyen en la propagación de las señales

El análisis examinó las pérdidas de propagación, la cobertura, el consumo energético y los requisitos de instalación de los sistemas de radar Doppler, además del funcionamiento del módulo HB100 y de diferentes escenarios de detección y radiolocalización, cuyos resultados permitieron identificar las posibilidades, limitaciones y requerimientos técnicos para implementar aplicaciones de corto alcance dentro del contexto ecuatoriano, considerando la eficiencia operativa y la coexistencia con los servicios radioeléctricos existentes

3.1 Metodología aplicada para el análisis técnico y operativo

Para desarrollar este capítulo se realizó una revisión de bibliografía técnica, normativa y documentación relacionada con la banda de 10 GHz. La idea no fue recopilar información por separado, sino entender cómo se está utilizando esta banda en otros países y analizar qué tan viable sería aprovecharla en Ecuador.

La metodología utilizada fue de tipo documental con un análisis descriptivo y comparativo. Se revisó bibliografía científica, normativa nacional e internacional y casos de uso relacionados con la banda de 10 GHz, para posteriormente comparar esa información y valorar su posible aplicación en el contexto ecuatoriano.

Primero se revisó el estado actual de las telecomunicaciones en el país, considerando la infraestructura disponible, el uso del espectro radioeléctrico y el nivel de desarrollo tecnológico. Después se estudiaron las características de la banda de 10 GHz, prestando atención a aspectos como la propagación de la señal, las pérdidas, la cobertura y el comportamiento frente a las condiciones geográficas y climáticas del Ecuador.

Con esa información ya fue posible comparar las dos tecnologías que se tomaron como referencia en esta investigación: UWB y Radar Doppler. Cabe precisar que UWB se incorporó únicamente como referencia normativa y tecnológica, dado que, si bien organismos como la FCC y el ETSI habilitan su operación hasta 10.6 GHz, en la práctica su desarrollo comercial se ha estandarizado en canales distintos (canales 5 y 9), por lo que no se contempló su análisis en profundidad ni como alternativa a desarrollar en la propuesta final, orientándose el trabajo hacia el Radar Doppler como la tecnología con mayor evidencia de implementación real dentro de la banda de 10 GHz.

Como parte del análisis también se revisó la normativa y la documentación publicada por organismos como la UIT, ETSI, la FCC y ARCOTEL, con el fin de conocer los criterios técnicos y regulatorios que actualmente se aplican para este tipo de tecnologías.

Finalmente, toda esa información sirvió para elaborar el plan de explotación tecnológica presentado en este trabajo, procurando que las recomendaciones respondan a las condiciones del Ecuador y no sean simplemente una adaptación de experiencias desarrolladas en otros países.

Como parte del análisis también se revisó la normativa y la documentación publicada por organismos como la UIT, ETSI, la FCC y ARCOTEL, con el fin de conocer los criterios técnicos y regulatorios que actualmente se aplican para este tipo de tecnologías.

Finalmente, toda esa información sirvió para elaborar el plan de explotación tecnológica presentado en este trabajo, procurando que las recomendaciones respondan a las condiciones del Ecuador y no sean simplemente una adaptación de experiencias desarrolladas en otros países.

3.2 Diagnóstico del contexto nacional de telecomunicaciones

Hablar de telecomunicaciones en el Ecuador implica mirar un escenario que no ha avanzado de manera uniforme. Hay progresos claros, pero también vacíos que siguen ahí. En los últimos años, el acceso a servicios de conectividad ha mejorado, sobre todo en las ciudades, donde la tecnología llega más rápido. En cambio, en zonas rurales o alejadas, el avance ha sido más lento y muchas veces condicionado por la geografía, los costos y una planificación que no siempre logra adaptarse a esas realidades.

A nivel nacional, gran parte de la conectividad se sostiene sobre infraestructuras ya conocidas: redes de microondas y enlaces inalámbricos de capacidad media que han permitido cubrir amplias zonas del país. Han cumplido su función, sin duda. Pero también dejan abierta una pregunta importante: ¿están realmente preparadas para dar el salto hacia tecnologías más recientes y hacia bandas de frecuencia más altas, como la de 10 GHz? Plantear esta duda sirve para entender por qué se vuelve necesario analizar nuevas formas de aprovechar el espectro disponible.

Desde el ámbito de la política pública, el discurso ha estado enfocado en modernizar el sector y promover un uso más eficiente del espectro radioeléctrico (Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información, 2022). Sin embargo, en la práctica, la utilización de nuevas bandas y tecnologías suele avanzar lento, priorizando esquemas ya conocidos y dejando poco espacio para la experimentación controlada. Este panorama deja claro que el país cuenta con una base técnica sobre la cual trabajar, pero también enfrenta desafíos evidentes

relacionados con la innovación, la flexibilidad normativa y la necesidad de pensar el desarrollo del sector con una visión más amplia y de largo plazo.

3.2.1 Infraestructura de redes y capacidades tecnológicas del país

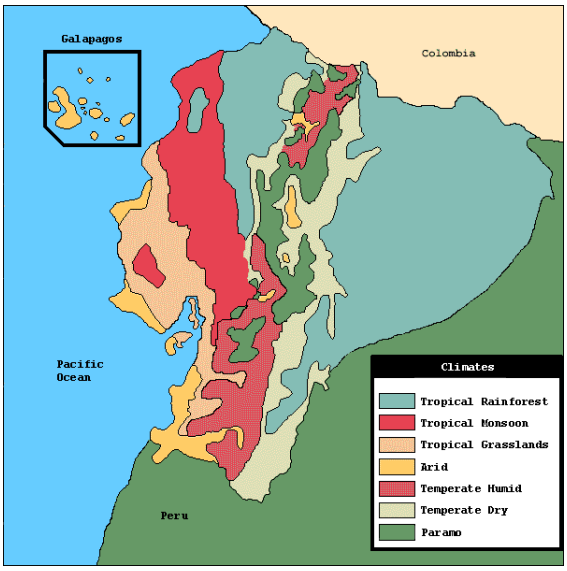
La infraestructura de telecomunicaciones en el Ecuador se caracteriza por una combinación de redes de fibra óptica, enlaces inalámbricos y sistemas de microondas, que en conjunto sostienen la conectividad nacional. En las principales ciudades, la fibra óptica es protagonista como medio de transporte de datos, especialmente para el backbone de los operadores y para servicios de alta capacidad. Sin embargo, fuera de los grandes centros urbanos, los enlaces inalámbricos siguen siendo una solución práctica y, muchas veces, la única viable (Rivera et al., 2020).

Si se miran las capacidades tecnológicas del país desde la parte operativa, es claro que Ecuador tiene la base necesaria para desplegar enlaces en frecuencias medias e incluso altas, siempre que se tomen en cuenta las particularidades de cada entorno. Durante años se han operado sistemas inalámbricos que requieren conocimiento técnico, planificación y mantenimiento. Eso demuestra que la experiencia e infraestructura existe, aunque en muchos casos no se lo lleve tan lejos como podría.

En la **Figura 21** podemos observar que la geografía ecuatoriana es diversa y exigente . La costa, la sierra y la amazonia presentan condiciones muy distintas entre sí, y cada una impone límites concretos al diseño y al rendimiento de las redes. La presencia de montañas, la humedad constante en ciertas zonas y las áreas de difícil acceso obligan a pensar dos veces antes de implementar nuevas tecnologías. En ese tipo de escenarios, suele ganar la confiabilidad por encima de la experimentación. Esto ayuda a entender por qué bandas como la de 10 GHz, a pesar de sus ventajas técnicas en aplicaciones específicas, todavía no han tenido un uso extendido en el país.

Figura 21.

Zonas climáticas en Ecuador



Fuente: (*Climas Del Ecuador*, 2015)

3.2.2 Ecosistema de innovación y desarrollo tecnológico

El ecosistema de innovación en telecomunicaciones en Ecuador es diverso, aunque todavía existen dificultades para que todos los actores trabajen de forma coordinada. Las universidades, por ejemplo, cumplen un papel importante en la formación de profesionales y en el desarrollo de proyectos de investigación aplicada. Sin embargo, muchas de estas iniciativas no llegan a convertirse en pruebas de campo o proyectos piloto. Esta realidad también se refleja en el Global Innovation Index 2024, donde Ecuador ocupa el puesto 105 de 133 economías evaluadas, lo que muestra que aún hay espacio para fortalecer la investigación, la innovación y la transferencia tecnológica hacia el sector productivo (WIPO, 2024).

Los gobiernos autónomos descentralizados (GAD) también impulsan proyectos relacionados con seguridad, monitoreo urbano y gestión del territorio. No obstante, muchas veces sus decisiones dependen del presupuesto disponible y de la capacidad técnica de cada institución.

Por esta razón, suele ser más común optar por tecnologías ya consolidadas que explorar soluciones nuevas o poco utilizadas.

En el caso del sector privado ocurre algo parecido. Aunque existe mayor interés por incorporar nuevas tecnologías, las inversiones normalmente se orientan hacia soluciones que ya cuentan con resultados comprobados. Esto hace que tecnologías emergentes o el uso de bandas menos explotadas, como la de 10 GHz, avancen con mayor lentitud. Aun así, el crecimiento de la conectividad representa un escenario favorable. Según el INEC (2024), el 79,8 % de los hogares ecuatorianos tiene acceso a Internet, una cifra que muestra que el país dispone de una base importante para incorporar aplicaciones inalámbricas y soluciones tecnológicas en los próximos años.

3.3 Condiciones técnicas y ambientales de la banda de 10 GHz en Ecuador

Antes de pensar en cómo explotar tecnológicamente la banda de 10 GHz, primero hay que entender cómo se comporta en la práctica dentro del contexto ecuatoriano. No es suficiente quedarse solo con fichas técnicas o con experiencias de otros países, porque las condiciones locales juegan un papel clave en el rendimiento real de estas frecuencias.

La banda de 10 GHz forma parte del rango de microondas, lo que le da ventajas interesantes en capacidad y nivel de detalle, pero también trae consigo ciertas limitaciones relacionadas con la propagación de la señal. En un país como Ecuador, donde la humedad es alta, las lluvias son frecuentes y la geografía cambia drásticamente entre costa, sierra y amazonia, estas características influyen directamente en cómo se comporta la banda y en qué tan viable resulta su uso en escenarios reales.

3.3.1 Factores geográficos y climáticos que afectan la propagación

El Ecuador presenta una diversidad geográfica poco común para su tamaño. Costa, sierra y región amazónica ofrecen condiciones muy distintas entre sí, y cada una plantea retos particulares para la propagación de señales en la banda de 10 GHz. En la región costera, por ejemplo, la alta humedad y las lluvias intensas pueden generar atenuaciones adicionales, especialmente durante ciertas épocas del año. Este fenómeno, conocido como atenuación por lluvia, es más evidente en bandas de microondas y debe considerarse desde la fase de planificación (Llerena, 2023).

En la sierra, la presencia de elevaciones abruptas y cambios constantes de altitud dificulta la continuidad de enlaces de línea de vista, obligando a un diseño más cuidadoso de los sistemas. No obstante, estas mismas condiciones pueden favorecer enlaces punto a punto bien planificados, siempre que se disponga de una correcta ubicación de los nodos.

Por su parte, la región amazónica combina alta humedad, vegetación densa y acceso limitado, lo que convierte a esta zona en un escenario más complejo para la explotación de la banda. A pesar de ello, en aplicaciones localizadas o de carácter experimental, el uso de 10 GHz no resulta imposible, aunque sí más exigente desde el punto de vista técnico.

3.3.2 Parámetros operativos: pérdidas, cobertura y consumo energético

Cuando se analizan bandas de frecuencia como la de 10 GHz, los parámetros operativos ayudan a entender cómo se comporta en la práctica y bajo qué condiciones ofrece un desempeño aceptable. Aspectos como las pérdidas de propagación, la cobertura efectiva y el consumo energético son factores importantes para evaluar su viabilidad en el contexto ecuatoriano (Blanco, 2022)

A diferencia de las bandas de menor frecuencia, la operación en 10 GHz requiere un análisis más cuidadoso desde la etapa de diseño. Las decisiones relacionadas con el trazado del enlace, las características del entorno y el tipo de aplicación tienen un efecto directo sobre el desempeño del sistema. La banda muestra buenos resultados cuando existe una planificación técnica adecuada, pero tiende a presentar limitaciones cuando se la implementa sin un estudio previo bien definido.

Pérdidas de propagación en la banda de 10 GHz

Uno de los primeros aspectos que se deben considerar en la banda de 10 GHz son las pérdidas de la señal durante la propagación. Al tratarse de una frecuencia relativamente alta, la señal es más sensible a las condiciones del entorno si se la compara con bandas más bajas.

Entre las principales causas de pérdida se encuentran (Ribadeneira-Ramirez et al., 2022):

- La atenuación por espacio libre, que aumenta conforme crece la frecuencia.
- La lluvia, un factor relevante en muchas zonas del Ecuador.
- La presencia de obstáculos físicos, como edificios, árboles o irregularidades del terreno.
- Una alineación deficiente de las antenas, que puede afectar el desempeño del enlace.

Estas características no significan que la banda sea problemática, sino que requiere un diseño más cuidadoso. En enlaces bien planificados, estas pérdidas pueden controlarse y mantenerse dentro de márgenes aceptables.

Cobertura y alcance

En términos de cobertura, la banda de 10 GHz no está pensada para cubrir grandes áreas ni para aplicaciones de acceso masivo. Su comportamiento es más adecuado para enlaces específicos y bien definidos, donde se dispone de línea de vista entre los puntos de comunicación

Figura 22

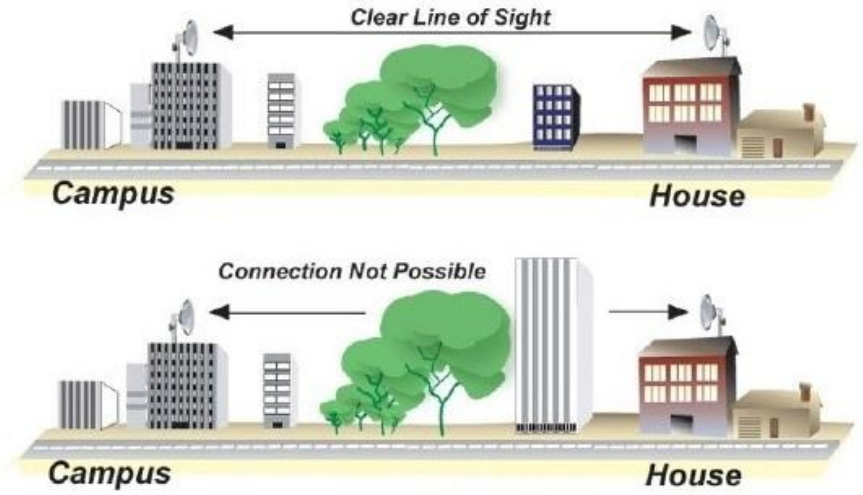
De manera general, la cobertura se caracteriza por:

- Alcances cortos a medios, dependiendo del entorno.
- Alta dependencia de la línea de vista directa.
- Mejor desempeño en entornos urbanos controlados, industriales o institucionales.

Esto hace que la banda sea ampliamente utilizada en escenarios donde se busca estabilidad. y calidad del enlace, más que una cobertura extensa.

Figura 22.

Ilustración de la línea de vista entre dos puntos de comunicación



Fuente: (Club de Radio Experimentadores, 2020)

Consumo energético

El consumo energético en la banda de 10 GHz suele generar ciertas dudas cuando se hacen comparaciones con bandas más bajas. Se podría pensar que al trabajar con frecuencias más altas el gasto de energía siempre será mayor, pero en la práctica no funciona exactamente así.

En realidad, el consumo depende en gran medida del tipo de aplicación y del diseño del enlace. En sistemas donde se aprovechan antenas direccionales y se mantiene una correcta alineación, no es necesario operar con potencias elevadas. Esto permite que el consumo se mantenga en niveles razonables, incluso en enlaces que requieren alta estabilidad (Zidar et al., 2024).

Muchas de las tecnologías que pueden trabajar en la banda de 10 GHz están pensadas para operar con potencias bien controladas, donde lo importante no es cubrir grandes distancias, sino que el sistema funcione de forma eficiente. Visto así, el consumo de energía deja de ser un problema crítico y pasa a ser un aspecto más dentro del diseño del enlace.

Además, el consumo energético en este tipo de aplicaciones depende en gran medida del ciclo de trabajo del dispositivo y de la potencia de transmisión utilizada. En el caso de tecnologías como UWB, la norma IEEE 802.15.4ab incorpora mecanismos de operación de baja potencia que favorecen su uso en dispositivos alimentados por baterías y redes de sensores, reduciendo la demanda energética durante su funcionamiento (Farsaei et al., 2025). Esto hace que el impacto del consumo sea menor, siempre que la banda se utilice en escenarios acordes con sus características y no se destine a aplicaciones para las que no fue diseñada (Bole et al., 2019).

Finalmente, no basta con quedarse en lo teórico, es importante entender cómo se comporta realmente la banda de 10 GHz cuando entra en operación. En la **Tabla 3.** *Tabla operativa – funcional de la banda de 10 GHz* se resumen los principales parámetros operativos de esta banda, que sirven como referencia para evaluar su posible uso tecnológico dentro del contexto ecuatoriano

Tabla 3.

Tabla operativa – funcional de la banda de 10 GHz

Parámetro operativo	Valor típico	Comentarios
Tipo de cobertura	Localizada	No apta para cobertura masiva
Alcance operativo	Corto a medio	Depende de alineación y entorno
Pérdidas por propagación	Medias a altas	Mayores que en bandas sub-6 Ghz
Sensibilidad a obstáculos	Alta	Afectan edificaciones y vegetación
Necesidad de línea de vista	Alta	Clave para enlace estables
Estabilidad del enlace	Alta	En entornos controlados
Nivel de interferencia	Bajo	Menor congestión espectral
Potencia	Limitada	Comúnmente a ≤ -3 dBW para estaciones fijas/móviles, salvo excepciones regulatorias.

Nota. La tabla resume los parámetros operativos utilizados para la evaluación técnica de la banda de 10 GHz que influyen en la viabilidad de las tecnologías analizadas. Elaboración propia.

3.4 Funcionamiento del dispositivo HB100 en un radar efecto Doppler

La tecnología radar Doppler es una alternativa bastante práctica cuando el objetivo no es conocer una posición exacta, sino identificar movimiento, velocidad o presencia dentro de un área determinada (Silva & Cartagena, 2021). En el contexto ecuatoriano, estas características son muy útiles para muchas aplicaciones reales como control perimetral, meteorología, monitoreo de zonas sensibles o detección de intrusiones, proporcionando respuestas confiables y en tiempo real **Figura 23**.

Una de las ventajas más evidentes de esta tecnología es que no necesita que las personas u objetos utilicen dispositivos adicionales. El sistema funciona de manera pasiva desde el punto de vista del usuario, lo que facilita su adopción en espacios públicos, instalaciones industriales o

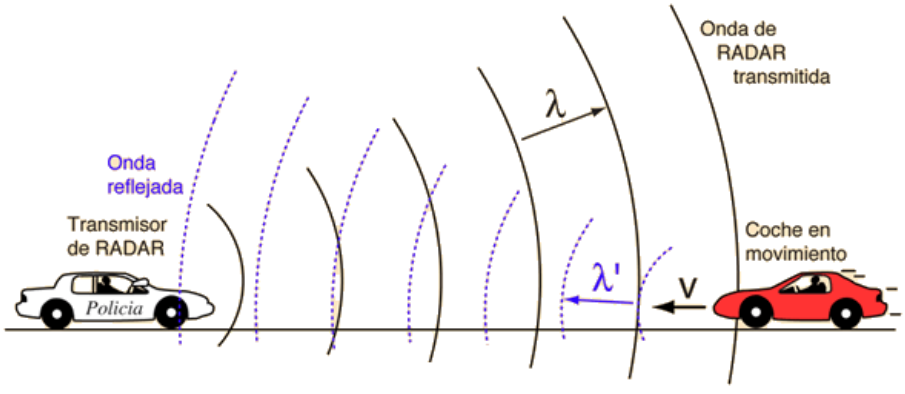
entornos académicos, esto reduce costos operativos y evita problemas asociados a la gestión de equipos individuales.

En cuanto a la instalación, los radares Doppler que operan en la banda de 10 GHz pueden integrarse sin muchas complicaciones a infraestructuras existentes. Su montaje en paredes, postes o estructuras elevadas no exige modificaciones estructurales complejas, lo cual se adapta bien a la realidad de muchas edificaciones en Ecuador, donde se priorizan soluciones rápidas y de bajo impacto físico.

El principio de funcionamiento Doppler permite detectar variaciones en la frecuencia de la señal reflejada cuando un objeto se encuentra en movimiento (Silva & Cartagena, 2021). La Figura 20 muestra de forma clara este principio: el radar emite una señal, la cual se refleja en un objeto en movimiento y retorna con una frecuencia distinta, lo que permite estimar la velocidad o simplemente confirmar la presencia de movimiento en la zona monitoreada. Este esquema, comúnmente asociado a radares de control vehicular, ayuda a visualizar cómo la tecnología puede adaptarse a otros escenarios sin cambiar su lógica básica de operación.

Figura 23.

Esquema de funcionamiento de un radar Doppler para detección de movimiento



Fuente: (hyperphysics, 2024)

Ahora bien, las condiciones ambientales del país deben tomarse en cuenta, por ejemplo, la humedad elevada, las lluvias frecuentes o la exposición prolongada al sol obligan a considerar equipos con protección adecuada para uso exterior. Sin embargo, estas condiciones no representan una limitación técnica significativa, sino más bien criterios normales de selección y diseño que deben contemplarse en la etapa de planificación.

Por lo tanto, la adaptación del radar Doppler al entorno ecuatoriano debe darse tomando en cuenta sus fortalezas, las cuales son: simplicidad, robustez y la facilidad de integración, lo que lo convierte en una opción viable para aplicaciones donde el monitoreo de movimiento y la respuesta rápida son más relevantes que la localización exacta.

3.4.1 Simulación en MATLAB y análisis de resultados

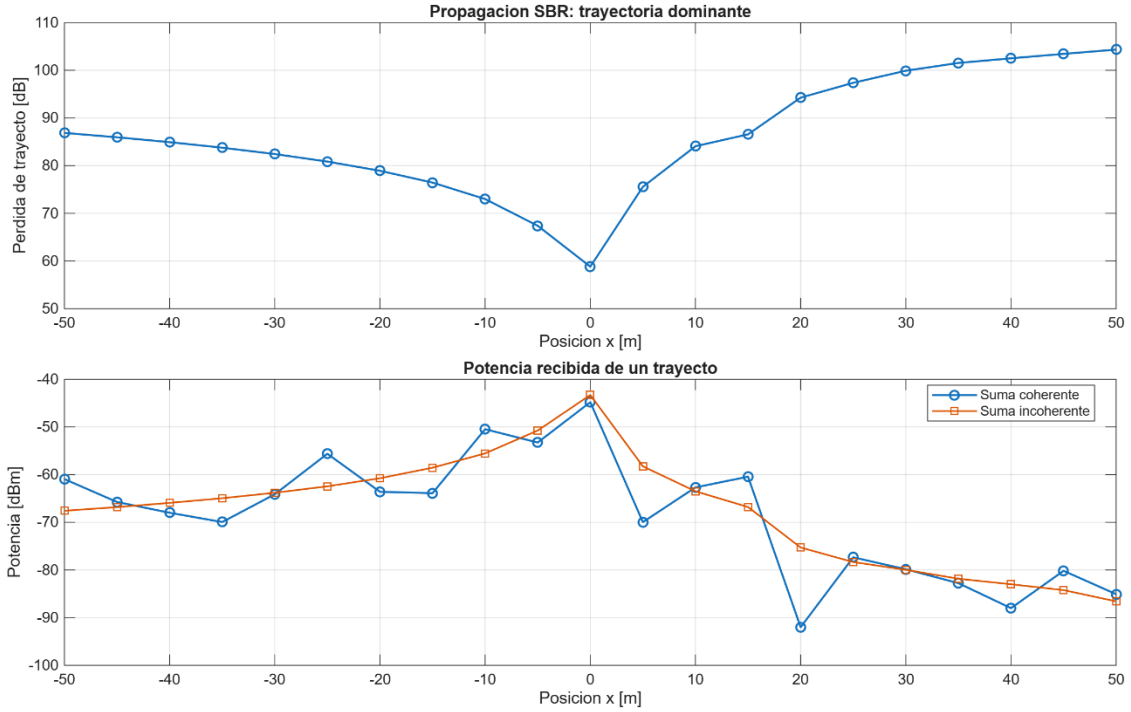
El escenario de prueba se realizó combinando Blender para la parte gráfica 3D y MATLAB para la física de radiofrecuencia. Toda la geometría (el tramo de vía, la posición del radar y el recorrido del vehículo) se diseñó en Blender y se exportó a MATLAB. En MATLAB se corrió un algoritmo de trazado de rayos (SBR) que calcula la propagación y los rebotes de la señal electromagnética antes de regresar al sensor.

- **Comportamiento del canal y propagación**

Los análisis de propagación muestran que las pérdidas de trayectoria disminuyen a medida que el vehículo se aproxima al origen (posición $x = 0\ m$), alcanzando el punto de máxima potencia recibida (**Figura 24**).

Figura 24.

Pérdida de trayectoria y potencia recibida a lo largo de la trayectoria del vehículo.

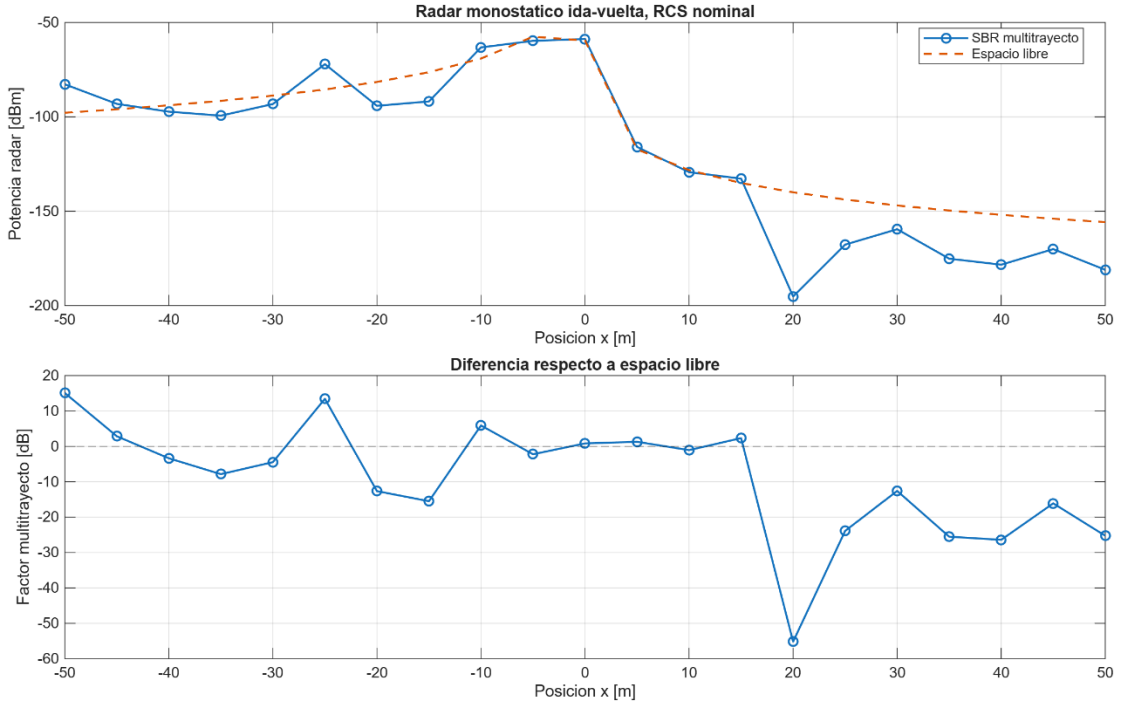


Nota: La gráfica superior muestra la pérdida del trayecto directo (SBR). La gráfica inferior compara la potencia recibida mediante suma coherente e incoherente a lo largo del recorrido.

Sin embargo, el entorno introduce fluctuaciones significativas por multitrayecto. Como se observa en la **Figura 25**, el factor de multitrayecto varía entre -55.2 dB y +15.1 dB con respecto al modelo de espacio libre, reflejando zonas de atenuación profunda e interferencias constructivas causadas por los rebotes en la vía y estructuras adyacentes.

Figura 25.

Comparación de potencia recibida frente al modelo de espacio libre y factor de multitrayecto.

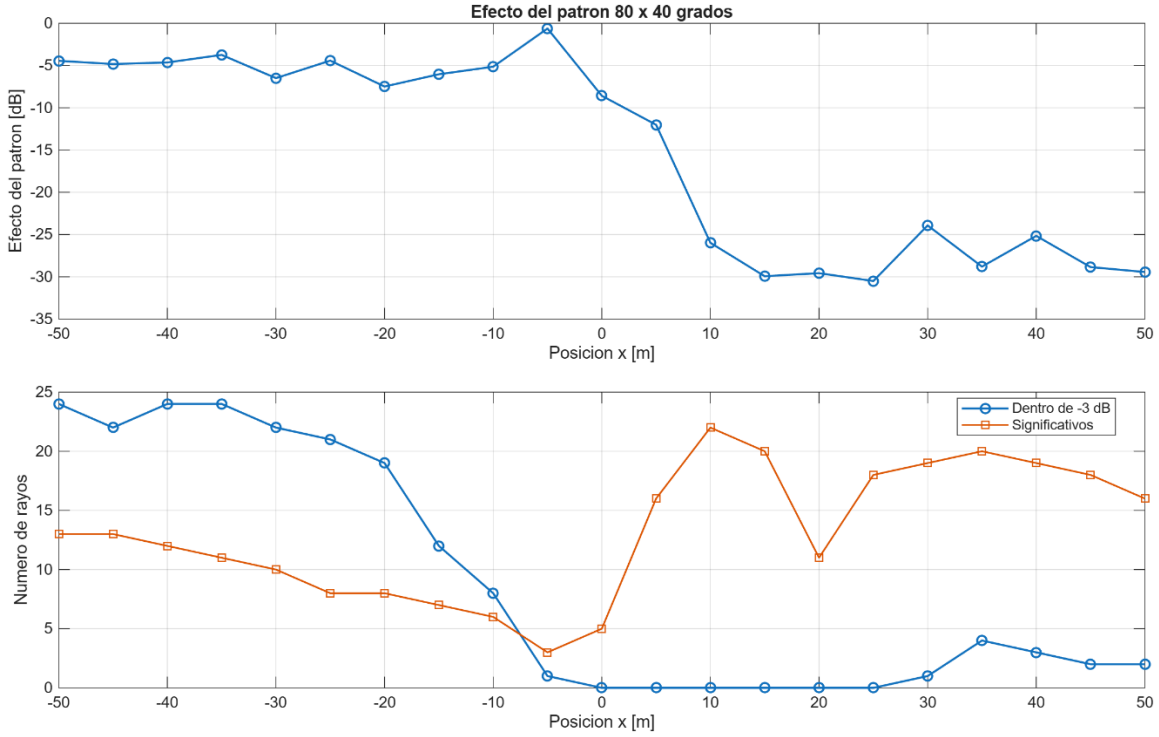


Nota: Se observa la desviación de la potencia recibida con el algoritmo SBR respecto al modelo teórico de espacio libre debido a la interferencia por rebotes.

Además, el patrón de radiación del módulo (80° x 40°) tiene influencia directa en la cantidad de rayos significativos captados (**Figura 26**), manteniendo un efecto mediano en la ganancia del patrón de -8.58 dB.

Figura 26.

Efecto del patrón de radiación de la antena y recuento de rayos significativos



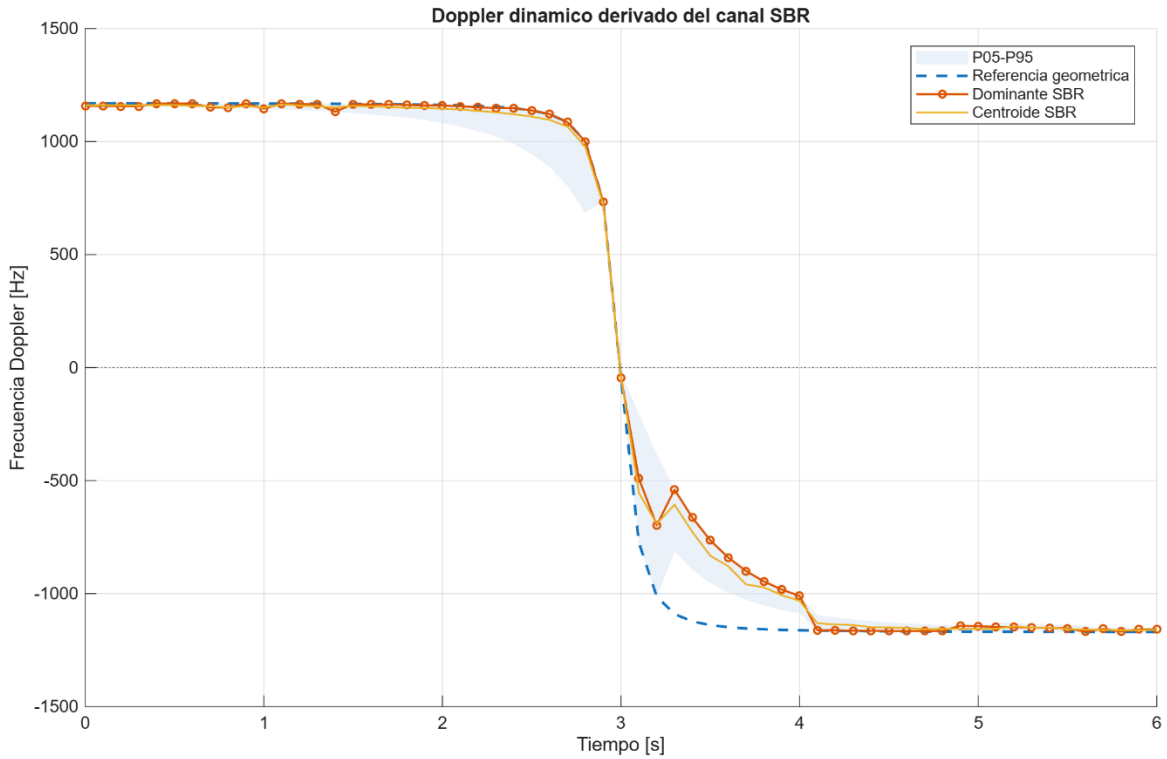
Nota: Muestra la variación en la ganancia por la directividad de la antena y la cantidad de rayos dentro del haz de -3 dB a medida que cambia la posición del móvil.

- **Análisis Doppler y estimación de velocidad**

La señal de frecuencia intermedia (IF) capturada en el tiempo se procesó mediante la Transformada de Fourier de Tiempo Reducido (STFT) para extraer el perfil Doppler dinámico (**Figura 27**). La curva estimada mediante el centroide SBR sigue de cerca la referencia geométrica del recorrido, mostrando la transición característica cuando el móvil pasa frente al sensor alrededor del segundo 3.

Figura 27.

Evolución temporal de la frecuencia Doppler durante el paso del vehículo.

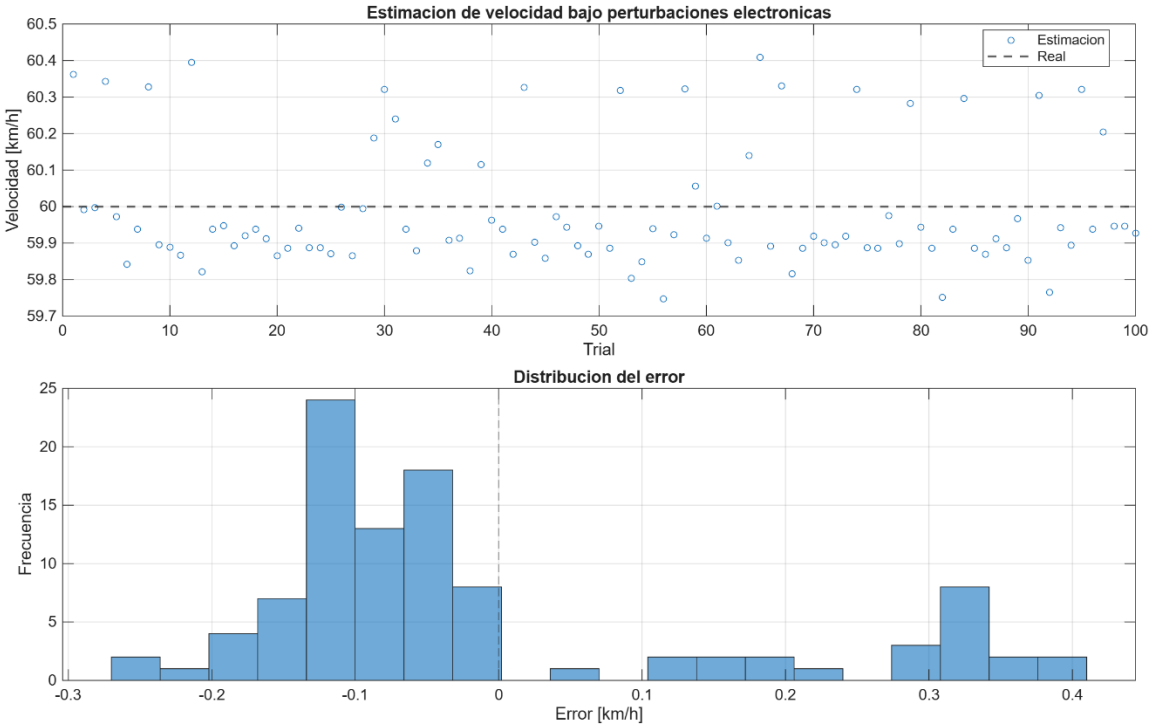


Nota: Comparación entre la referencia geométrica teórica y los valores extraídos mediante la trayectoria dominante y el centroide del espectro SBR.

Para verificar la precisión del algoritmo frente a ruido térmico y perturbaciones electrónicas, se ejecutó una simulación Monte Carlo de 100 iteraciones a una velocidad real de 60.00 km/h (**Figura 28**). El estimador registró una velocidad promedio de 59.932 km/h, lo que equivale a un error relativo de solo -0.11%. La distribución de errores se mantuvo concentrada en valores muy bajos, alcanzando un Error Absoluto Medio (MAE) de 0.137 km/h y un percentil 95 (P95) de error de 0.328 km/h.

Figura 28.

Distribución del error y lecturas del estimador en 100 pruebas Monte Carlo.

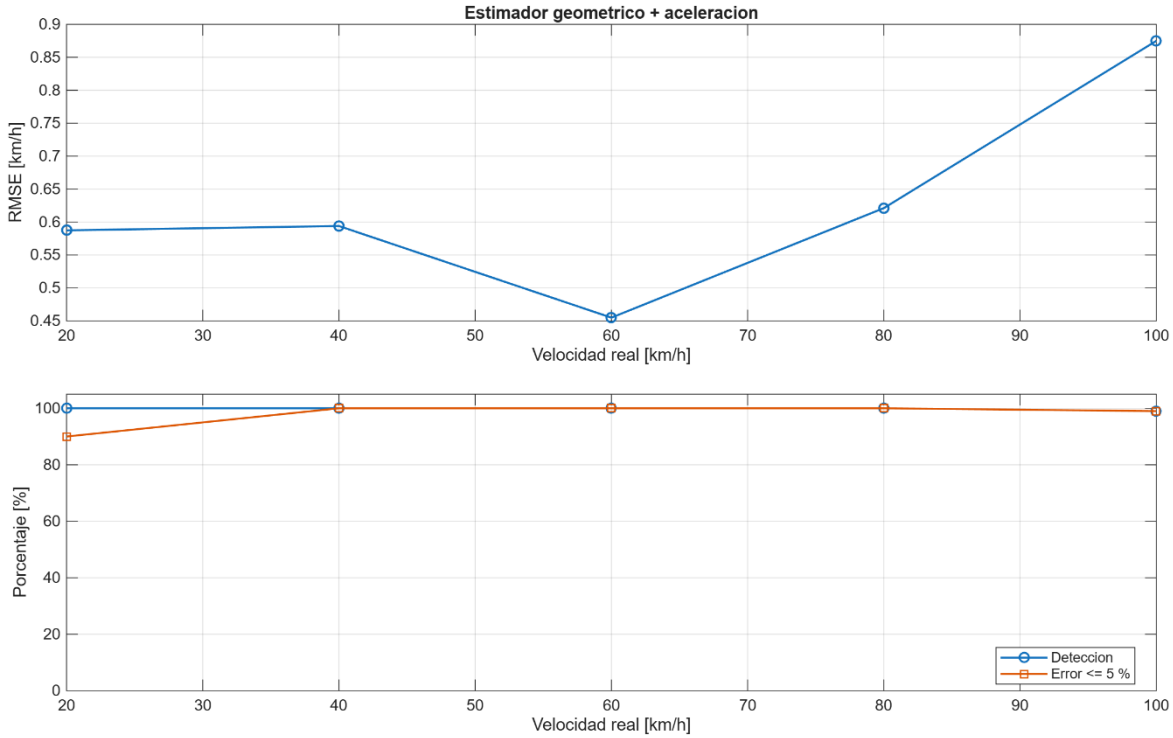


Nota: En la parte superior se observa la dispersión de las lecturas frente al valor real (60 km/h) y en la parte inferior el histograma de frecuencias del error.

Por otra parte, la evaluación del desempeño frente a distintas velocidades operativas (**Figura 29**) confirma que el sistema mantiene una tasa de detección del 100% y un porcentaje de lecturas dentro del margen tolerable (≤ 5%) en todo el rango evaluado.

Figura 29.

Error cuadrático medio (RMSE) y porcentaje de detección en función de la velocidad real.

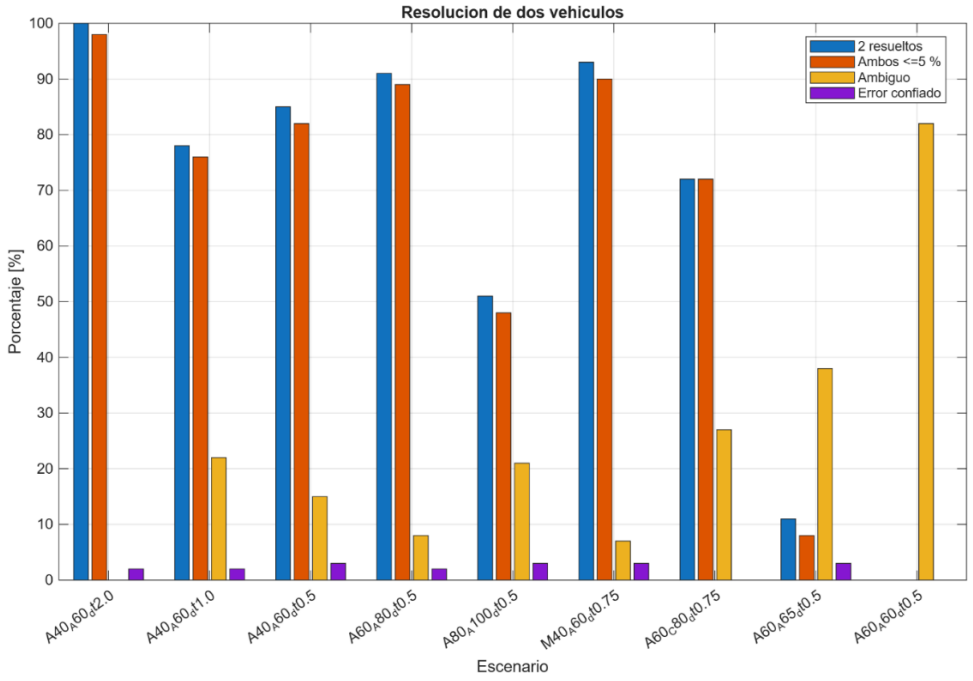


Nota: Desempeño del estimador geométrico con aceleración al evaluar distintas velocidades de desplazamiento entre 20 km/h y 100 km/h.

En las pruebas con dos vehículos a la vez (**Figura 30**), el programa pudo diferenciar ambas velocidades sin problema siempre que vinieran separados por 0.5 segundos o más.

Figura 30.

Porcentaje de resolución exitosa para dos vehículos simultáneos según el tiempo de separación.

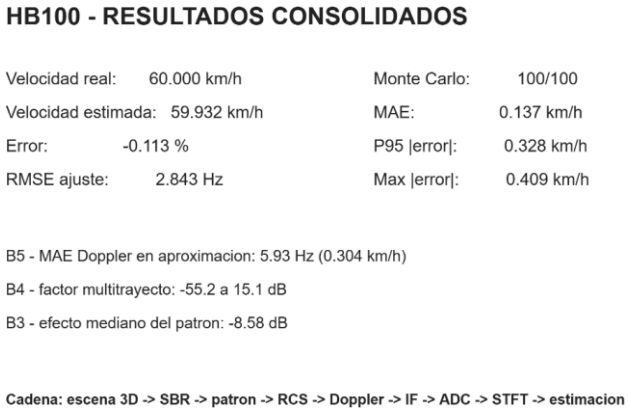


Nota: Capacidad para diferenciar dos vehículos cambiando la apertura de la antena y el tiempo de separación (t).

La **Figura 38** muestra los datos principales obtenidos durante las pruebas con el módulo HB100.

Figura 31.

Resultados principales obtenidos en la simulación del sensor HB100.



Nota: Esquema con los indicadores de error, el efecto de multitrayecto y la secuencia de procesamiento utilizada.

Los valores finales del desempeño del radar se organizan en la **Tabla 4.** *Resultados del desempeño del radar HB100 en simulación*.

Tabla 4.

Resultados del desempeño del radar HB100 en simulación

Parámetro	Valor Obtenido
Velocidad real de prueba	60.000 km/h
Velocidad estimada promedio	59.932 km/h
Error relativo	-0.113%
RMSE del ajuste	2.843 Hz
Pruebas Monte Carlo (éxito)	100/100
Error Absoluto Medio (MAE)	0.137 km/h
Error Máximo Absoluto	0.409 km/h
Error Percentil 95 (P95)	0.328 km/h
Rango de factor multitrayecto	-55.2 dB a + 15.1 dB
Efecto mediano del patrón de antena	-8.58 Db

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de simulación

- **Análisis de resultados y cierre del caso de estudio**

Estos datos demuestran que usar radares de bajo costo en 10 GHz funciona bien para controlar el paso de vehículos en áreas industriales. Aunque el metal y el asfalto provocan rebotes fuertes que hacen caer la potencia recibida (con caídas de potencia de hasta -55.2 dB), el filtrado con la Transformada de Fourier (STFT) logra limpiar esas interferencias y sacar la velocidad real con un error menor al 0.2%.

Hacer la simulación antes de instalar equipos en campo sirvió para varios puntos:

- ✓ **Revisar la cobertura de la antena:** Se pudo ver de antemano cuánta señal capta realmente la antena (80° x 40°) según la posición del vehículo.

- ✓ **Probar los límites del sistema**: Permitió meter ruido eléctrico y simular el paso de dos carros seguidos para medir qué tan cerca pueden pasar sin que el programa confunda las lecturas (0.5 segundos de separación mínima).
- ✓ **Ajustar el procesamiento**: Se deja lista la lógica de filtrado analógico y digital en la computadora antes de gastar en materiales o hacer pruebas físicas en bodega.

3.4.2 Interoperabilidad, coexistencia e integración tecnológica

Uno de los retos más comunes cuando se analizan tecnologías que operan en una misma banda de frecuencia es la manera en que conviven entre sí y con los sistemas ya existentes. En el caso de la banda de 10 GHz, su explotación no puede verse aisladamente, sino como parte de un ecosistema tecnológico más amplio (Instituto Federal de Telecomunicaciones, 2017).

Hablando de interoperabilidad, la tecnología analizada (radar Doppler) presentan características distintas, pero no necesariamente incompatibles. Cada una tiene objetivos operativos específicos, por lo que se debería definir reglas claras de operación.

En términos prácticos, la interoperabilidad debería considerar aspectos como:

- Separación funcional de aplicaciones, evitando que dos tecnologías cumplan el mismo propósito dentro de un mismo espacio.
- Uso definido de parámetros operativos, como niveles de potencia, ancho de banda o ciclos de transmisión.
- Integración a nivel de sistema, donde la información generada por cada tecnología se consolida en plataformas comunes de monitoreo o gestión.

La coexistencia en la banda de 10 GHz es otro punto importante. Al tratarse de una banda para aplicaciones de corto alcance y uso especializado, la idea es minimizar interferencias. Experiencias internacionales muestran que esto puede lograrse mediante esquemas de

compartición del espectro, especialmente cuando se trabaja con dispositivos de baja potencia o con uso intermitente de la señal (Candal-Ventureira et al., 2024).

En este contexto, se podría plantear escenarios donde:

- Sistemas UWB operen en interiores con potencias controladas.
- Radares Doppler se utilicen en aplicaciones perimetrales o de monitoreo.
- Tecnologías experimentales funcionen bajo licencias temporales o entornos de prueba.

Para el caso ecuatoriano, la integración de nuevas tecnologías debe considerar las capacidades técnicas existentes, el nivel de especialización del personal y la necesidad de soluciones sostenibles en el tiempo. En lugar de despliegues complejos, se priorizan esquemas modulares, escalables y compatibles con la infraestructura actual.

Finalmente, la interoperabilidad, coexistencia e integración tecnológica en la banda de 10 GHz depende de la tecnología, planificación técnica adecuada y de un marco regulatorio que facilite la experimentación controlada. Tomando en cuenta todo lo anterior, es posible aprovechar la banda de manera eficiente sin comprometer la estabilidad de los sistemas existentes.

3.5 Funcionamiento del radar de vigilancia marítima con detección CFAR

Como complemento al análisis del radar Doppler de bajo costo (HB100), se desarrolló una segunda simulación de un radar de vigilancia marítima operando en banda X, exactamente a 10.000 GHz, tomando como referencia funcional al radar comercial Safran Series 10 LPI CSR, cuya banda de operación se ubica en el rango I-Band (aproximadamente 8-10 GHz) y cuya aplicación está orientada a la navegación y vigilancia táctica de objetivos sobre la superficie marítima desde plataformas submarinas.

A diferencia del sensor HB100, que opera bajo el principio de radar Doppler de onda continua, esta simulación reproduce la arquitectura de un radar de pulsos con detección adaptativa

CFAR, más representativa del tipo de sistema empleado en aplicaciones de vigilancia naval de mayor escala como la del equipo de referencia.

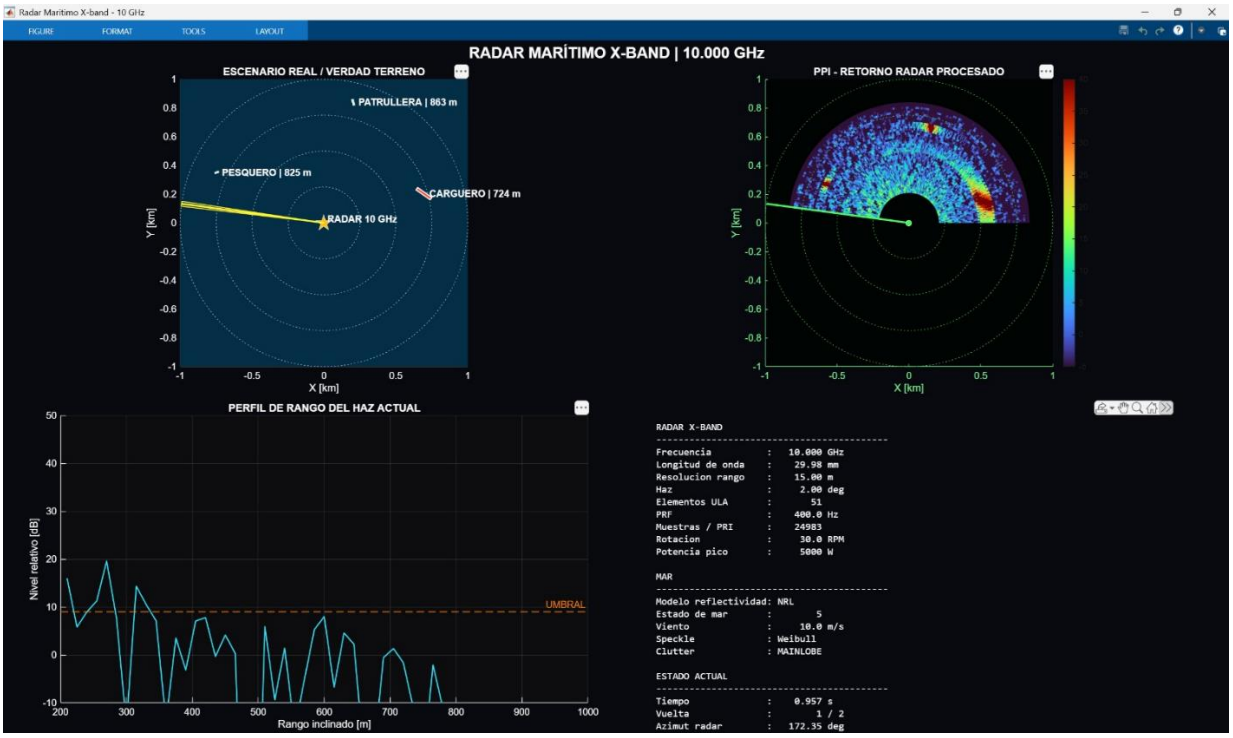
El escenario simulado comprende una zona marítima de 2 km por 2 km, con el radar ubicado en el centro y tres embarcaciones en movimiento: un carguero, una patrullera y un pesquero. El radar realiza un barrido completo de 360 grados durante dos vueltas, mostrando tanto la posición real de los barcos como la información obtenida por el propio sistema radar. Cada embarcación posee dimensiones, velocidad, dirección y capacidad de reflexión (RCS) diferentes, lo que permite observar comportamientos distintos durante la detección.

Para representar mejor un entorno real, se incorporó una superficie marina dinámica con estado de mar 5, viento de 10 m/s, reflectividad NRL y variaciones estadísticas tipo Weibull. Esto hace que el mar también produzca retornos de señal (clutter), y no únicamente las embarcaciones. La señal recibida es procesada mediante filtrado adaptado y un detector GOCA-CFAR, que ajusta automáticamente el umbral de detección de acuerdo con el nivel de clutter presente, reduciendo así las falsas alarmas causadas por las reflexiones del mar.

En la **Figura 32** se muestra la simulación muestra de manera simultánea el escenario real, el haz del radar girando, las trayectorias de los barcos, un indicador de posición en planta (PPI) con los retornos detectados, el perfil de potencia respecto a la distancia y el umbral CFAR adaptativo. También permite comparar la distancia y el azimut verdaderos con los valores detectados, observar los errores de medición, y apreciar el desplazamiento de los objetivos entre una vuelta y otra estimando su velocidad a partir de dos posiciones detectadas consecutivas, demostrando de forma gráfica una aplicación práctica de la banda de 10 GHz en vigilancia marítima de mayor escala.

Figura 32

Funcionamiento del Safran Series 10 LPI CSR



En la **Tabla 5** se presentan los principales parámetros establecidos para la configuración y simulación del sistema de radar marítimo, incluyendo las características de operación, el modelo de reflectividad marina y el método de detección empleado.

Tabla 5

Parámetros usados para la simulación

Parámetro	**Valor**
Frecuencia	10,000 GHz
Resolución de rango	15 m
Ancho de haz azimutal	2°
Elementos del arreglo (ULA)	51
PRF	400 Hz
Rotación	50 RPM
Potencia pico	5000 W
Modelo de reflectividad marina	NRL
Estado de mar	5
Detector	GOCA-CFAR ($Pfa = 1 \times 10^{-3}$)

3.6 Evaluación comparativa y análisis de viabilidad nacional

Luego de revisar las características técnicas de la banda de 10 GHz y las tecnologías que pueden operar en ella, este apartado se centra en llevar ese análisis al contexto ecuatoriano. El objetivo es comparar estas tecnologías desde una mirada práctica, considerando cómo se ajustan a las condiciones técnicas, operativas y regulatorias del país.

Más que quedarse en una descripción teórica, se busca evaluar qué tan viables resultan en la práctica, tomando en cuenta aspectos como la facilidad de implementación, su compatibilidad con la infraestructura existente y las posibilidades reales de adopción en Ecuador

3.6.1 Comparación técnica y operativa entre UWB y radar Doppler

Las tecnologías UWB y radar Doppler presentan diferencias claras en cuanto a su funcionamiento y campo de aplicación, tomando en cuenta que UBW solo se ha tomado como referencia. Mientras UWB se orienta a la localización precisa de objetos o personas, el radar Doppler se emplea principalmente para la detección de movimiento y variaciones en el entorno.

Estas diferencias se reflejan en sus características técnicas y operativas, las cuales se resumen en la siguiente **Tabla 6**

Tabla 6.

Comparación técnica y operativa entre UWB y radar Doppler en la banda de 10 GHz

Criterio	UWB	Radar Doppler
Tipo de aplicación	Localización de alta precisión	Detección de movimiento
Nivel de precisión	Alto	Medio
Requerimiento de dispositivos portables	Sí	No
Complejidad de instalación	Media	Baja
Integración con infraestructura existente	Alta	Alta
Sensibilidad al entorno	Media	Baja
Escenarios de uso	Interiores, entornos académicos	Seguridad, monitoreo

Nota. Elaboración propia

Desde el punto de vista operativo, estas diferencias nos muestran en qué tipo de aplicaciones cada tecnología resulta más adecuada. UWB ofrece ventajas en entornos donde se

requiere precisión espacial, mientras que el radar Doppler se adapta mejor a escenarios donde se prioriza la detección de presencia o movimiento con menor complejidad técnica.

Ahora bien, no todo depende solo de cuál tecnología es más precisa o más simple de implementar. También hay que mirar cómo está distribuido el espectro en esa franja y si realmente hay espacio disponible para usarla.

En la banda cercana a 10 GHz, parte del espectro ya puede estar asignado a otros servicios según el Plan Nacional de Frecuencias, por lo que cualquier implementación tendría que revisar primero qué segmentos están ocupados y cuáles podrían habilitarse, al menos de forma experimental. Esto es clave, porque una cosa es que técnicamente se pueda operar ahí, y otra es que esté libre o permitido hacerlo.

En cuanto al equipamiento, el radar Doppler suele tener mayor presencia comercial, especialmente en aplicaciones de control de velocidad, seguridad o monitoreo industrial, lo que facilita conseguir dispositivos ya desarrollados. UWB, en cambio, suele operar con límites de potencia más estrictos y con aplicaciones más específicas, por lo que su disponibilidad puede depender más del tipo de proyecto y del proveedor.

Por eso, además de la comparación técnica, conviene considerar tres aspectos prácticos:

- Cómo está distribuida actualmente la banda en el país.
- Si existen segmentos que puedan usarse bajo esquemas experimentales.
- Qué tan accesible y disponible es el equipamiento en el mercado.

Al final, estos factores pueden influir tanto como las características técnicas al momento de decidir qué tecnología resulta más viable en el contexto ecuatoriano

3.6.2 Análisis de viabilidad técnica, económica y regulatoria

La evaluación de la viabilidad se realiza considerando las condiciones técnicas del espectro radioeléctrico, la capacidad económica del mercado nacional y el marco regulatorio vigente en el Ecuador. Este análisis permite determinar si la implementación de servicios basados en dicha banda es factible y sostenible en el contexto nacional.

a) Viabilidad técnica de la banda de 10 GHz

Desde el punto de vista técnico, la banda de 10 GHz presenta características favorables para la provisión de servicios de telecomunicaciones que demandan altos niveles de capacidad y estabilidad. Entre los principales aspectos técnicos evaluados se consideran:

- **Disponibilidad espectral**: en el contexto nacional, banda que presenta menor nivel de congestión frente a bandas tradicionales de menor frecuencia.
- **Capacidad de transmisión:** adecuada para enlaces de alta velocidad, especialmente en aplicaciones de acceso inalámbrico fijo, enlaces punto a punto y punto a multipunto.
- **Comportamiento de propagación:** alcances moderados y mayor sensibilidad a obstáculos, lo que permite una planificación más controlada del espectro y reducción de interferencias.
- **Compatibilidad con tecnologías actuales**: utilizadas en sistemas de microondas, backhaul y redes inalámbricas de alta capacidad.
- **Adaptabilidad al entorno geográfico:** considerando que la topografía ecuatoriana favorece el uso de enlaces dirigidos en zonas urbanas y suburbanas.

En este contexto, la banda de 10 GHz resulta técnicamente viable para su explotación, siempre que se realice una planificación adecuada de los enlaces y se consideren las condiciones de línea de vista requeridas.

b) Viabilidad económica de la explotación de la banda

La viabilidad económica se analiza considerando los costos asociados a la implementación de infraestructura, el potencial de mercado y la relación entre inversión y beneficios esperados.

Dentro de este análisis se destacan los siguientes elementos:

- Costos de infraestructura, asociados principalmente a equipos de transmisión, antenas especializadas y sistemas de soporte.
- Reducción de costos operativos, al permitir enlaces inalámbricos que evitan la necesidad de despliegues extensivos de infraestructura física.
- Potencial de generación de ingresos, mediante la provisión de servicios de conectividad de alta capacidad para sectores productivos, educativos y gubernamentales.
- Interés del sector privado, particularmente de operadores que buscan alternativas para ampliar cobertura o mejorar enlaces de transporte.
- Escalabilidad del modelo de explotación, permitiendo ampliar servicios de forma progresiva según la demanda.

Bajo estas condiciones, la explotación de la banda de 10 GHz presenta una viabilidad económica favorable, especialmente como complemento a otras bandas y tecnologías existentes.

c) Viabilidad regulatoria y normativa en el Ecuador

El análisis de la viabilidad regulatoria para la explotación tecnológica de la banda de 10 GHz se fundamenta en el marco jurídico ecuatoriano que regula la gestión del espectro radioeléctrico. Este marco no establece prohibiciones específicas para el uso de la banda, lo que permite su aprovechamiento desde un enfoque técnico y estratégico.

Desde el punto de vista normativo, los principales elementos que respaldan esta viabilidad son los siguientes:

- **Naturaleza jurídica del espectro radioeléctrico**

La Ley Orgánica de Telecomunicaciones reconoce al espectro radioeléctrico como un bien de dominio público, cuya administración corresponde al Estado, a través del organismo regulador competente (ARCOTEL). Esto faculta al Estado a planificar y autorizar el uso de las bandas de frecuencia conforme a criterios técnicos y de interés público.

- **Competencias de la autoridad reguladora**

  La normativa otorga a la ARCOTEL la capacidad de:

  - planificar el uso del espectro,
  - definir esquemas de asignación de frecuencias,
  - autorizar nuevos usos o aplicaciones tecnológicas, siempre que estos se encuentren debidamente sustentados desde el punto de vista técnico.

- **Principio de uso eficiente y racional del espectro**

La legislación ecuatoriana incorpora de forma explícita el principio de uso eficiente del espectro radioeléctrico. Este principio promueve: la evaluación de bandas subutilizadas, la incorporación de nuevos usos tecnológicos, y la optimización del recurso espectral.

- **Flexibilidad para esquemas experimentales y de prueba**

El marco normativo permite la habilitación de autorizaciones temporales o experimentales, orientadas a: pruebas técnicas, proyectos piloto, validación de nuevas tecnologías. Esta posibilidad es importante en fases iniciales de explotación tecnológica de una banda.

- **Armonización con estándares internacionales**

La normativa nacional reconoce la necesidad de alinearse con las recomendaciones de organismos internacionales, particularmente la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).

Esto respalda el análisis de la banda de 10 GHz bajo criterios técnicos aceptados globalmente y facilita su futura integración en la planificación nacional del espectro.

A partir de estos elementos, se concluye que la explotación tecnológica de la banda de 10 GHz en el Ecuador es normativamente viable, siempre que se desarrolle dentro de esquemas regulados, con sustento técnico y en coherencia con la planificación del espectro radioeléctrico nacional.

3.6.3 Resultados del diagnóstico técnico y operativo

Luego de revisar las condiciones técnicas, operativas y el contexto nacional, se puede resumir los principales hallazgos sobre el uso potencial de la banda de 10 GHz en el Ecuador. Este apartado no introduce nuevos elementos, sino que recoge lo observado en los análisis previos y lo presenta de forma clara para dar paso al plan de explotación.

Aspectos técnicos identificados

Desde el punto de vista técnico, la banda de 10 GHz muestra un comportamiento acorde con aplicaciones donde la cobertura no necesita ser extensa, pero sí bien controlada. En este sentido, se observa que:

- La banda funciona mejor en enlaces de corto y medio alcance, donde se busca estabilidad y tiempos de respuesta bajos.
- Las pérdidas de propagación, propias de este rango de frecuencias, no representan una limitación crítica cuando existe una adecuada planificación del despliegue.
- Su uso resulta más conveniente en espacios definidos, como edificios, instalaciones industriales o zonas urbanas específicas.

Estos elementos permiten entender que la banda no está pensada para cubrir grandes áreas, sino para resolver necesidades puntuales con buen nivel de precisión.

Condiciones operativas y de uso

En cuanto a la operación, el diagnóstico muestra que la banda de 10 GHz puede utilizarse sin que sea necesario replantear por completo la infraestructura existente. Lo que realmente marcará la diferencia será definir correctamente aspectos como la planificación del espectro, la homologación de equipos y las condiciones de operación de cada aplicación. Si estos elementos se consideran desde el inicio, la incorporación de esta banda puede hacerse de forma gradual y con un riesgo técnico relativamente bajo.

También se observa que las tecnologías analizadas pueden trabajar junto con plataformas de monitoreo y gestión que ya se utilizan en entornos industriales o de telecomunicaciones. Esto facilita su integración y evita desarrollar soluciones completamente nuevas para administrarlas.

Más allá de que la tecnología funcione, también es importante analizar qué tan preparada está la realidad ecuatoriana para aprovecharla. Para ello no basta con revisar aspectos técnicos; también es necesario considerar la disponibilidad del espectro, el marco regulatorio, la existencia de equipos compatibles, el mercado potencial y otros factores que influyen en una futura implementación.

Con esa idea, en la **Tabla 7** se elaboró un checklist de verificación que reúne los principales aspectos evaluados durante esta investigación. Además, se incorporó una valoración del aporte que ofrecen las experiencias analizadas en Alemania y Estados Unidos como referencia para el caso ecuatoriano. Esta valoración utiliza una escala de 0,2 a 1,0, donde 0,2 representa un aporte bajo, 0,4 un aporte limitado, 0,6 un aporte medio, 0,8 un aporte alto y 1,0 un aporte muy alto. No se trata de calificar a los países, sino de mostrar qué tan útiles resultan esas experiencias para orientar una posible explotación de la banda de 10 GHz en Ecuador.

Tabla 7.

Checklist de viabilidad para la explotación de la banda de 10 GHz en Ecuador

Aspecto evaluado	Estado (✓ / Parcial / ✗)	Significado en la práctica	Qué haría falta completar	Aporte de las experiencias internacionales
Disponibilidad espectral	Parcial	Es necesario verificar qué segmentos están asignados y cuáles podrían destinarse a nuevos servicios.	Revisión actualizada del Plan Nacional de Frecuencias.	0.4
Marco regulatorio	Parcial	Puede operar como servicio licenciado, experimental o SVA, pero debe definirse claramente.	Determinar tipo de título habilitante y condiciones técnicas.	0.6
Tipo de servicio explotable	Parcial	Aplicable a monitoreo, sensores inteligentes y redes privadas	Clasificación formal del servicio y campo explotable	0.8
Equipamiento disponible	✓	Existe hardware comercial compatible en el mercado	Validar homologación conforme normativa nacional.	1.0
Integración operativa (software y gestión)	Parcial	Puede integrarse con sistemas de monitoreo y plataformas inteligentes.	Definir plataforma de gestión y supervisión.	0.8
Infraestructura nacional	✓	Puede implementarse en entornos urbanos, industriales o académicos sin grandes cambios.	Planificar despliegue por zonas específicas.	0.6
Mercado potencial	Parcial	Interesante para sector industrial y proyectos piloto.	Estudio de demanda y análisis de viabilidad económica.	0.8
Accesibilidad económica	Parcial	No es tecnología masiva; se adapta mejor a nichos técnicos.	Evaluación costo–beneficio	0.4
Aceptación del usuario	Parcial	Alta probabilidad en entornos técnicos; baja en consumo general.	Definir casos de uso con valor claro.	0.6

Alineación estratégica país	Parcial	Puede apoyar procesos de digitalización y automatización.	Integrarla dentro de planes nacionales TIC.	0.8

Nota. elaboración propia

La información presentada en la tabla no solo permite identificar el estado técnico y regulatorio de la banda, sino que también evidencia que la explotación de la banda de 10 GHz no debe plantearse como un servicio masivo, sino como una herramienta tecnológica orientada a nichos específicos.

El estado “Parcial” que aparece en los criterios de mercado potencial, accesibilidad económica y aceptación del usuario refleja que su adopción dependerá directamente del enfoque con el que se implemente. No se trata de una banda pensada para consumo residencial ni para sustituir servicios comerciales existentes, sino para aplicaciones técnicas donde su desempeño tenga un valor real.

Desde el punto de vista económico, el costo del equipamiento y despliegue podría no justificarse si se orienta al usuario común. Sin embargo, en entornos industriales, académicos o de monitoreo especializado, donde se requiere estabilidad, baja latencia y confiabilidad en distancias controladas, el beneficio operativo puede compensar la inversión inicial. Esto explica por qué en la tabla el equipamiento disponible figura como viable, pero el mercado masivo como parcial.

La clave está en el modelo de explotación. Si se integra dentro de proyectos de automatización, redes privadas, sensores inteligentes o entornos experimentales, la banda puede convertirse en un habilitador tecnológico. En cambio, si se pretende introducirla sin un sector objetivo claramente definido, el riesgo económico aumenta y la demanda real podría ser limitada.

Por eso, la tabla marca como “Parcial” los aspectos relacionados con política pública y alineación estratégica. La banda puede aportar valor al país, pero necesita estar vinculada a

programas de digitalización industrial, innovación tecnológica o desarrollo académico. Sin esa integración, su explotación quedaría aislada y con bajo impacto.

En términos regulatorios, el estado parcial también indica que no existe una barrera estructural que impida su uso, pero sí se requiere una definición clara del tipo de servicio, campo explotable y condiciones técnicas. Una vez definido ese marco, la implementación puede realizarse de manera controlada y progresiva, comenzando con proyectos piloto que permitan validar demanda, rendimiento y sostenibilidad. Finalmente, el análisis demuestra que:

- Técnicamente la banda es viable.
- Operativamente puede implementarse con infraestructura existente.
- El equipamiento comercial está disponible.
- El factor determinante no es técnico, sino estratégico y económico.
- Su explotación debe ser focalizada y no generalizada.

Con esto, la adopción de la banda no se justifica por cantidad de usuarios, sino por calidad de aplicación y valor agregado en sectores específicos.

3.7 Síntesis técnica del análisis realizado

Todo el análisis desarrollado en este capítulo muestra que la banda de 10 GHz sí puede tener aplicaciones útiles dentro del contexto ecuatoriano, aunque no necesariamente como una tecnología de uso masivo. Su mayor potencial aparece en escenarios más específicos, donde se necesitan comunicaciones estables, tiempos de respuesta bajos o sistemas de monitoreo más precisos.

En la parte técnica, tanto UWB como radar Doppler demostraron tener características que podrían aprovecharse en el país, especialmente en espacios controlados como industrias, laboratorios, campus universitarios o sistemas de censado. También se observó que el

comportamiento de la banda depende bastante del entorno, por lo que la planificación de canales, potencia y ubicación de los sistemas termina siendo un punto importante.

Por otro lado, el análisis regulatorio deja ver que sí existen bases para trabajar este tipo de tecnologías, aunque todavía haría falta definir con más claridad ciertos aspectos relacionados con autorizaciones, homologación de equipos y condiciones de operación. Esto hace que una implementación progresiva tenga más sentido que un despliegue amplio desde el inicio.

También quedó claro que la viabilidad no depende solo de que la tecnología funcione. Factores como el costo, el tipo de aplicación y la demanda real del mercado influyen bastante en la posibilidad de adopción. Por eso, el uso de esta banda parece tener más sentido en proyectos especializados o de valor agregado antes que en servicios orientados al usuario común.

En general, el análisis permite ver que la banda de 10 GHz sí tiene posibilidades de explotación tecnológica en Ecuador, pero su desarrollo tendría que hacerse de forma gradual, con aplicaciones bien definidas y apoyándose en pruebas controladas antes de pensar en implementaciones más amplias.

4 Capítulo IV: Plan de Explotación Tecnológica de la banda de 10 GHz

A partir del análisis desarrollado en el Capítulo III, este capítulo formula el plan de explotación de la banda de 10 GHz para el contexto ecuatoriano. Se define primero el marco de gestión y el título habilitante aplicable según ARCOTEL, y ante la ausencia de una norma técnica nacional propia, se adopta como referencia la normativa de la FCC sobre frecuencia fundamental y límites de emisión para sensores de perturbación de campo. Sobre esa base, se plantean estrategias de coexistencia espectral, una arquitectura de implementación lógica, tres escenarios de aplicación industrial, seguridad y académico y un análisis final de viabilidad y alineación con el desarrollo tecnológico nacional.

4.1 Marco de Gestión y Títulos Habilitantes

Cuando se habla de explotar una banda del espectro, no todo depende de si la tecnología funciona bien o no. También es, muy importante la parte regulatoria, porque cualquier sistema que opere sobre frecuencias radioeléctricas necesita ajustarse a las condiciones establecidas por la ARCOTEL y al esquema legal que existe en el país.

En el caso de la banda de 10 GHz, no se trata de una banda pensada para servicios masivos tradicionales, sino más bien para aplicaciones específicas, enlaces controlados o sistemas especializados. Por eso, antes de pensar en implementaciones más amplias, primero conviene definir bajo qué tipo de servicio podrían operar estas tecnologías y qué modelo de autorización tendría más sentido dentro del contexto ecuatoriano.

En este contexto, la propuesta de explotación tecnológica desarrollada en esta investigación se orienta principalmente a escenarios de operación controlada. Esto implica considerar aplicaciones donde sea posible definir con claridad aspectos como la potencia de transmisión, el alcance de la comunicación, el tipo de usuarios y las condiciones de funcionamiento, de manera

que la incorporación de tecnologías como UWB y Radar Doppler pueda realizarse respetando el marco regulatorio vigente:

En lugar de pensar en despliegues abiertos o masivos, el enfoque se dirige más a:

- redes privadas;
- servicios especializados;
- proyectos piloto;
- automatización industrial;
- monitoreo inteligente;
- y entornos de investigación.

Ese tipo de esquema encaja mucho mejor con las características técnicas de la banda y también con el estado actual del mercado nacional.

4.1.1 Clasificación del servicio: Servicios de Valor Agregado (SVA) y Redes Privadas

Tomando en cuenta las aplicaciones analizadas en el capítulo anterior, una de las alternativas más viables es trabajar esta banda bajo esquemas de Servicios de Valor Agregado (SVA) o redes privadas. En ambos casos, la idea no es ofrecer cobertura pública a gran escala, sino implementar soluciones más específicas y controladas.

Por ejemplo, varias de las aplicaciones propuestas como monitoreo inteligente, sensores, automatización o detección de presencia funcionan mejor dentro de espacios delimitados. Ahí es donde las redes privadas toman sentido. Una industria, un campus universitario o incluso una instalación logística pueden operar este tipo de sistemas sin necesidad de desplegar infraestructura pública extensa.

Además, muchas de estas tecnologías priorizan estabilidad y baja latencia antes que cobertura amplia. Eso hace que una red privada sea mucho más coherente para este tipo de escenarios.

Por otro lado, los Servicios de Valor Agregado también encajan bastante bien en esta propuesta. La normativa ecuatoriana contempla este tipo de servicios cuando existe una plataforma tecnológica que añade funcionalidades sobre una red de telecomunicaciones (ARCOTEL, 2025c). En este caso, podría relacionarse con:

- plataformas de monitoreo;
- control industrial;
- sensado inteligente;
- seguimiento de activos;
- o sistemas de supervisión en tiempo real.

Otro punto importante es que este enfoque permite avanzar poco a poco. Primero mediante pruebas controladas o despliegues pequeños, y después, dependiendo de los resultados, evaluar aplicaciones más amplias. Eso reduce riesgos técnicos y también regulatorios.

En términos prácticos, resulta mucho más viable comenzar con modelos cerrados y especializados que intentar llevar inmediatamente esta banda hacia servicios comerciales masivos, sobre todo considerando que todavía existe poca experiencia local trabajando con este tipo de tecnologías en frecuencias de 10 GHz. A continuación

En la **Tabla 8** se muestras las autoridades competentes que intervienen en el proceso de gestión de los títulos habilitantes.

Tabla 8

Autoridades y competencias

ARCOTEL	Administra/regula/controla telecomunicaciones y espectro; PNF; títulos habilitantes; frecuencias; homologación; control técnico; tarifas y registros.
Ministerio rector de telecomunicaciones	Política pública sectorial; el marco institucional debe revisarse según normativa vigente.
SENAE	Importación/exportación, clasificación arancelaria, declaraciones aduaneras y tributos al comercio exterior.
SRI	RUC e impuestos internos; ICE/IVA según normativa tributaria y operación del importador.
Ministerio del Trabajo	Publica el SBU usado por varias tarifas ARCOTEL; SBU 2026 = USD 482.
UIT-R	Marco internacional de atribuciones/recomendaciones técnicas; Ecuador implementa las decisiones pertinentes en su PNF.

4.1.2 Determinación del título Habilitante según la normativa de la ARCOTEL

Una vez definido el tipo de aplicaciones que podrían operar dentro de la banda de 10 GHz, el siguiente paso es identificar qué tipo de autorización o título habilitante sería el más adecuado según la normativa ecuatoriana. Esto es importante porque no todas las tecnologías ni todos los servicios se manejan bajo el mismo esquema regulatorio.

En el caso de esta propuesta, la mayor parte de aplicaciones planteadas se relacionan con sistemas de monitoreo, automatización, sensores y comunicaciones de corto alcance. Por esa razón, resulta más coherente pensar en esquemas asociados a:

- redes privadas;
- servicios de valor agregado;
- o autorizaciones experimentales.

Por ejemplo, si una universidad quisiera implementar un entorno de pruebas con sistemas Doppler dentro de un laboratorio o campus, lo más probable es que el proyecto pueda manejarse

mediante una autorización experimental o una red privada de uso interno. Algo parecido ocurriría en escenarios industriales donde la comunicación se limite a procesos internos de monitoreo o control (Asamblea Nacional República del Ecuador, 2025).

En cambio, si el sistema ofreciera servicios a terceros o transmitiera información como parte de una plataforma comercial más amplia, entonces podría entrar dentro de la categoría de Servicio de Valor Agregado (SVA), dependiendo de la forma en que se gestione la infraestructura y el servicio.

Otro aspecto que influye bastante es la potencia de operación y el alcance del sistema. Mientras más controlado y localizado sea el entorno, más viable resulta trabajar bajo esquemas simplificados o experimentales. Eso también ayuda a reducir riesgos de interferencia con otros servicios que ya utilizan partes de la banda.

Como se ve en la siguiente **Tabla 9**, la propuesta desarrollada en esta investigación se orienta principalmente a modelos de operación controlada y de alcance limitado, donde la gestión técnica y regulatoria pueda mantenerse bajo supervisión más sencilla durante las primeras etapas de implementación.

Tabla 9

Casos de uso y sus principales servicios

Caso	Servicio/título que debe evaluarse	Comentario
Sensor Doppler/radar para investigación	Radiolocalización + uso temporal/experimental o autorización específica	Adecuado cuando se trata de prueba no comercial limitada en tiempo; parámetros RF deben declararse.
Radar operacional permanente propio	Radiolocalización / red privada según arquitectura	No asumir que el módulo de baja potencia exime de permiso.
Enlace PTP entre dos instalaciones propias	Red Privada + concesión/autorización de frecuencias	No puede vender capacidad a terceros bajo Red Privada.
Backhaul/capacidad ofrecida a terceros	Servicio Portador + espectro	Requiere título de servicio; régimen económico distinto.

Acceso a Internet ofrecido a clientes	Servicio de Acceso a Internet + red/espectro	EQA.30 permite el uso del tramo para acceso fijo, pero necesita título y asignación.
I+D IMT en 10–10.5	Experimental/temporal + coordinación	No existe banda NR comercial estándar; sería prueba de investigación/prototipo.
Recepción pasiva	No hay transmisión intencional	Aun así, equipos que radien LO/fugas o importación pueden requerir evaluación de conformidad.

Nota. Elaboración propia

4.1.3 Requisitos y procedimientos para la homologación de equipos de la banda X

Para que un equipo que trabaje en la banda de 10 GHz pueda utilizarse legalmente en Ecuador, primero debe pasar por el proceso de homologación establecido por ARCOTEL. Este procedimiento aplica especialmente a equipos que utilizan espectro radioeléctrico y niveles de potencia superiores a 50 mW, categoría donde podrían entrar varios dispositivos asociados a UWB, radar Doppler, enlaces inalámbricos o sensores especializados (ARCOTEL, n.d.).

Actualmente, el trámite de homologación se realiza de forma virtual mediante el sistema en línea de ARCOTEL y no tiene costo. La entidad emite un certificado de homologación por clase, marca y modelo del equipo, luego de verificar que cumple las condiciones técnicas necesarias para operar dentro de redes de telecomunicaciones y sin generar interferencias perjudiciales (ARCOTEL, 2025a).

Entre los requisitos principales que solicita la ARCOTEL para homologar un equipo se encuentran:

- solicitud dirigida a la Dirección Ejecutiva de la ARCOTEL;
- ficha técnica o documento con especificaciones del equipo;
- manual técnico o documentación del fabricante;

- fotografías del equipo y de sus etiquetas;
- información de bandas de frecuencia utilizadas;
- y certificados internacionales reconocidos por ARCOTEL.

En equipos inalámbricos, también se revisan aspectos relacionados con:

- potencia radiada;
- estabilidad de frecuencia;
- emisiones fuera de banda;
- compatibilidad electromagnética;
- y funcionamiento dentro de los rangos autorizados.

Otro punto que hay que tomar en cuenta es que la ARCOTEL acepta certificaciones emitidas por organismos internacionales reconocidos. Entre los principales se encuentran:

- FCC (Estados Unidos);
- ETSI y certificaciones CE (Europa);
- ANATEL (Brasil);
- BIS (India);
- NCC (Taiwán);
- entre otros organismos técnicos internacionales.

Esto resulta bastante relevante para esta propuesta, porque muchos equipos que podrían utilizarse en aplicaciones de 10 GHz ya vienen certificados desde fábrica bajo normas FCC o ETSI. Los dispositivos para operar en esta banda se encuentran en la **Tabla 10**.

Además, la ARCOTEL establece que ciertos equipos deben presentarse físicamente para pruebas técnicas o verificación operativa. En esos casos, el dispositivo debe incluir (ARCOTEL, 2025b):

- acceso al conector RF o antena;
- adaptadores de prueba;
- cargadores y cables;
- e incluso software o herramientas que permitan realizar pruebas de transmisión continua, potencia y ancho de banda.

En términos prácticos, esto significa que cualquier implementación futura dentro de la banda de 10 GHz tendría que considerar la homologación como una etapa obligatoria antes de pasar a una operación formal. Sin embargo, el hecho de que ya existan procedimientos definidos y reconocimiento de certificaciones internacionales facilita bastante la incorporación de este tipo de tecnologías al entorno nacional.

Tabla 10

Equipos disponibles para operar en la banda de 10 GHz

Equipo	Frecuencia	Tecnología	Precio público ref.	Uso	Evaluación
HB100 genérico	10.525 GHz	CW Doppler transceiver	~USD 4,5–7	Sensor de movimiento/velocidad; salida IF analógica	Muy bajo costo; no da rango; cumplimiento depende del producto/país; no asumir licencia libre en Ecuador.
Analog Devices EVAL-CN0566-RPIZ (Phaser)	10.0–10.5 GHz	Arreglo en fase / beamformer de desarrollo	USD 2.875 fabricante; ~USD 3.241 DigiKey	Beam steering, radar/SDR, formación de haz	Plataforma de I+D completa; borde superior 10.5 GHz, no 10.525; requiere autorización para radiar en Ecuador.
Analog Devices	8–16 GHz	Beamformer 4 canales	~USD 1.730 listado	Arrays X/Ku, control fase/ganancia	Componente de arreglo; no es radar completo;

ADAR1000-EVALZ			histórico; disponibilidad limitada		precio/stock debe confirmarse.
Analog Devices ADL8107	6–18 GHz	LNA GaAs pHEMT	IC desde ~USD 63,96 @1k; eval por distribuidor	Front-end receptor, NF bajo	24 dB gain typ, NF ~1,3 dB; requiere PCB/filtrado/bias.
Qorvo QPA1022 / EVB	8.5–11 GHz	PA GaN ~4 W	EVB listado ~USD 1.000; IC cotización	Radar/driver X-band	24,5 dB gain, PAE ~45 %; requiere gestión térmica y autorización RF.
Qorvo QPA1010	7.9–11 GHz	PA GaN ~42 dBm (~15,8 W)	Cotización	Radar X-band de mayor potencia	Potencia peligrosa/alta EIRP con antenas; pruebas controladas y licencia.
Qorvo QPA2811	8.5–10.55 GHz	PA GaN Psat 48,9 dBm (~77,6 W)	Cotización	Radar de alta potencia	ECCN 3A001.B.2.B.2; export control; extrema atención a seguridad, térmica y regulación.
RACOM RAy10/RAy2 10 GHz	10.15–10.65 GHz según variante	Radioenlace PTP digital	Cotización /VAR	Backhaul/FWA, QAM/ACM	Equipamiento de red completo; canalización/licencia local indispensable.

Nota. Elaboración propia

4.2 Adopción de la Normativa de la FCC sobre Frecuencia Fundamental y Límites de Emisión para la Banda de 10 GHz

Después de revisar cómo se encuentra actualmente la banda de 10 GHz en Ecuador y las tecnologías que podrían trabajar sobre ella, ya es posible plantear una propuesta básica de

organización del espectro. La idea no es definir una distribución oficial, porque eso le corresponde a ARCOTEL, sino tomar como referencia técnica la distribución de frecuencia según la FCC.

En este tipo de bandas, la forma en que se distribuyen las frecuencias influye bastante en el funcionamiento de los equipos. Algunas tecnologías trabajan con señales más amplias, otras necesitan canales más estables y algunas funcionan solo por momentos. Por eso no tendría mucho sentido colocar todo dentro del mismo segmento sin ningún criterio de separación.

Además, varias de las aplicaciones analizadas en esta investigación están pensadas para escenarios bastante específicos. No se está proponiendo una red pública masiva, sino sistemas más controlados, por ejemplo:

- monitoreo;
- automatización;
- sensado;
- localización;
- o pruebas experimentales.

Eso también hace que la organización del espectro pueda manejarse de forma más flexible.

Otro punto importante es que gran parte de esta banda todavía no tiene un uso intensivo en el país. Comparada con otras frecuencias más comerciales, la banda de 10 GHz sigue teniendo bastante espacio para aplicaciones especializadas o proyectos piloto. Justamente por eso resulta interesante analizar cómo podría aprovecharse de manera más ordenada.

4.2.1 Segmentación propuesta para aplicaciones dentro de la banda de 10GHz

Tomando en cuenta las características de radar Doppler analizadas en los capítulos anteriores, se plantea una segmentación tomando como punto de partida la distribución de la banda de 10,0 a 10,7 GHz establecida en el Plan Nacional de Frecuencias del Ecuador. En lugar de

modificar esa estructura, se utilizó como referencia para asignar aplicaciones compatibles dentro de cada segmento, respetando las atribuciones ya existentes y procurando reducir posibles conflictos con otros servicios:

Desde el punto de vista matemático, el ancho de cada segmento se obtuvo mediante la diferencia entre su frecuencia superior e inferior:

$$B_i = f_{sup} - f_{inf}$$

B_i = ancho total de banda del segmento

f_{sup}= frecuencia superior

f_{inf}= frecuencia inferior

Para el segmento de sensores de perturbación de campo (FCC § 15.245):

$$B_1 = 10.550 - 10.500 = 0.050\ GHz$$

$$B_1 = 50\ MHz$$

El mismo procedimiento se aplicó al resto de los segmentos considerados en la propuesta, cuyos resultados se muestran en la **Figura 33**.

Figura 33

Segmentación propuesta para aplicaciones con sensores de perturbaciones de campo

Fundamental frequency (MHz)	Field strength of fundamental (millivolts/meter)	Field strength of harmonics (millivolts/meter)
902-928	500	1.6
2435-2465	500	1.6
5785-5815	500	1.6
10500-10550	2500	25.0
24075-24175	2500	25.0

Nota. Recuperada de Federal Communications Commission, *Title 47, Chapter I, Subchapter A, Part 15, Subpart C, § 15.245 — Operation within the bands 902-928 MHz, 2435-2465 MHz, 5785-5815 MHz, 10500-10550 MHz, and 24075-24175 MHz*, Electronic Code of Federal Regulations (eCFR) (FCC, 2026a).

La propuesta establece como límite superior los 10,68 GHz, ya que a partir de esa frecuencia el Plan Nacional de Frecuencias asigna el espectro principalmente a servicios pasivos, como radioastronomía e investigación espacial, los cuales requieren condiciones especiales de protección frente a interferencias. Por este motivo, el tramo comprendido entre 10,68 y 10,70 GHz no se incluyó dentro de la segmentación.

La distribución propuesta no busca dejar bloques totalmente rígidos. Más bien sirve como una referencia inicial para organizar aplicaciones con características distintas dentro de un mismo entorno espectral.

Radar Doppler suele operar de forma más constante y con señales más concentradas. Separar estos sistemas ayuda a mantener un funcionamiento más estable.

También se consideró que muchas de las aplicaciones planteadas funcionarían en espacios relativamente controlados, como industrias, laboratorios o campus universitarios. Eso facilita bastante la gestión de interferencias y el monitoreo técnico de los sistemas.

En el caso de los enlaces experimentales, la idea sería utilizarlos principalmente para:

- pruebas piloto;
- validación tecnológica;
- investigación;
- y análisis de desempeño en condiciones reales.

Ese enfoque resulta más coherente para una primera etapa de explotación tecnológica dentro del contexto ecuatoriano.

4.2.2 Especificaciones de potencia radiada (EIRP) y límites de emisión

Además de organizar el ancho de banda, es necesario definir los parámetros de potencia y emisión del módulo HB100, con el fin de verificar su cumplimiento respecto a la normativa adoptada como referencia y evitar interferencias con otros servicios que ya operan dentro de la banda de 10 GHz.

Los radares Doppler de corto alcance, como el módulo HB100 empleado en la presente investigación, se caracterizan por operar con niveles de potencia relativamente bajos y una emisión de tipo continua (onda continua no modulada), orientada a la detección de movimiento mediante el corrimiento de frecuencia de la señal reflejada. Estas características permiten que el dispositivo opere bajo el régimen de sensores de perturbación de campo establecido en la sección 47 CFR § 15.245 de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), sin requerir licencia individual, siempre

que se cumplan los límites de intensidad de campo definidos para el segmento de 10,500 a 10,550 MHz.

Verificación del cumplimiento normativo del módulo HB100

Para verificar que el módulo HB100 cumple con el límite de intensidad de campo establecido por la FCC, es necesario convertir la potencia EIRP reportada por el fabricante (en dBm) a intensidad de campo eléctrico (en mV/m), unidad en la que la normativa expresa dicho límite. La conversión se realiza mediante la siguiente expresión, válida en la región de campo lejano:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P}}{d}$$

Donde:

E: intensidad de campo eléctrico, en voltios por metro (V/m)

P: potencia radiada isotrópica equivalente (EIRP), en vatios (W)

d: distancia de medición, en metros (la FCC establece 3 metros como referencia)

El fabricante del módulo HB100 reporta una potencia de salida mínima (EIRP) de 13 dBm. Convirtiendo este valor a vatios:

$$P = 10^{\frac{13}{10}} \times 0.001\,\text{W} = 0.02\,\text{W} = 20\,\text{mW}$$

Aplicando la fórmula de intensidad de campo a la distancia de referencia de 3 metros:

$$E = \frac{\sqrt{30 \times 0.02}}{3} = \frac{\sqrt{0.6}}{3} \approx 0.258\,\text{V/m} = 258\,\text{mV/m}$$

El resultado obtenido (258 mV/m) se encuentra considerablemente por debajo del límite máximo de 2500 mV/m establecido en 47 CFR § 15.245 para el segmento de 10,500 a 10,550 MHz (Federal Communications Commission, 2025), lo que representa un margen de cumplimiento de aproximadamente 9.7 veces por debajo del umbral regulatorio. Este resultado confirma que el

módulo HB100 cumple ampliamente con los límites de emisión exigidos para su operación como sensor de perturbación de campo no licenciado.

4.3 Estrategias de Coexistencia Espectral

Uno de los puntos más importantes al trabajar con tecnologías dentro de la banda de 10 GHz es la coexistencia con otros sistemas ya presentes en el espectro. En Ecuador, esta banda no está completamente libre, ya que dentro de distintos segmentos existen atribuciones para servicios fijos, móviles, radiolocalización y algunas aplicaciones satelitales. Por esa razón, cualquier propuesta tecnológica necesita considerar mecanismos básicos que permitan compartir el espectro sin afectar otros servicios.

En el caso de UWB, la coexistencia suele ser más manejable debido a que trabaja con potencias extremadamente bajas y emisiones distribuidas sobre un ancho de banda amplio. Justamente por eso, organismos como FCC y ETSI han permitido su uso en aplicaciones de corto alcance, sensores y localización indoor bajo ciertos límites de emisión.

El radar Doppler tiene un comportamiento distinto. Sus señales suelen ser más continuas y concentradas, por lo que requieren un poco más de control respecto a separación de frecuencias y emisiones fuera de banda. Aun así, cuando se utilizan en interiores o escenarios controlados, el riesgo de interferencia sigue siendo relativamente bajo.

Tomando en cuenta estas características, la propuesta plantea estrategias simples de coexistencia orientadas principalmente a aplicaciones:

- indoor;

- de corto alcance;
- experimentales;
- y redes privadas.

La idea no es competir con otros servicios radioeléctricos ya establecidos, sino aprovechar segmentos de la banda donde pueda existir operación controlada y técnicamente administrable.

4.3.1 Análisis de interferencias con servicios fijos y satelitales existentes

La banda de 10 GHz ya tiene distintos servicios operando dentro de varios segmentos del espectro, por lo que cualquier propuesta tecnológica debe considerar posibles escenarios de interferencia y compatibilidad. En Ecuador, el Plan Nacional de Frecuencias mantiene atribuciones relacionadas con servicios fijos, radiolocalización y aplicaciones satelitales dentro de este rango, especialmente en segmentos cercanos a 10.6 GHz (ARCOTEL, 2026).

En el caso de los servicios fijos, muchos enlaces trabajan mediante antenas altamente direccionales y trayectorias bien definidas, lo que reduce la posibilidad de interferencias fuera del enlace principal. Por esta razón, la coexistencia con aplicaciones de corto alcance resulta técnicamente viable, siempre que se respeten las condiciones de operación, los límites de emisión y la separación de frecuencias establecidos para cada servicio.

La UIT menciona que una de las principales ventajas de UWB es justamente su capacidad de coexistir con otros sistemas radioeléctricos cuando se mantienen límites adecuados de potencia y ocupación espectral. Además, reportes recientes de compatibilidad espectral muestran que las aplicaciones de corto alcance presentan menores probabilidades de interferencia perjudicial, especialmente en escenarios indoor o de baja cobertura (Uit-r, 2018).

El radar Doppler requiere un análisis un poco más cuidadoso porque utiliza señales más continuas y concentradas en frecuencia. Aunque las aplicaciones consideradas en esta

investigación son de corto alcance, sigue siendo importante controlar emisiones fuera de banda y mantener separación suficiente respecto a otros servicios cercanos dentro de la banda X.

Otro aspecto importante es la presencia de sistemas satelitales. Según las recomendaciones UIT-R relacionadas con propagación Tierra-espacio, las bandas cercanas a 10.6 GHz pueden involucrar servicios sensibles de exploración satelital y radiocomunicaciones espaciales. En estos casos, factores como potencia radiada, elevación de antenas y propagación atmosférica influyen directamente en los niveles de interferencia potencial.

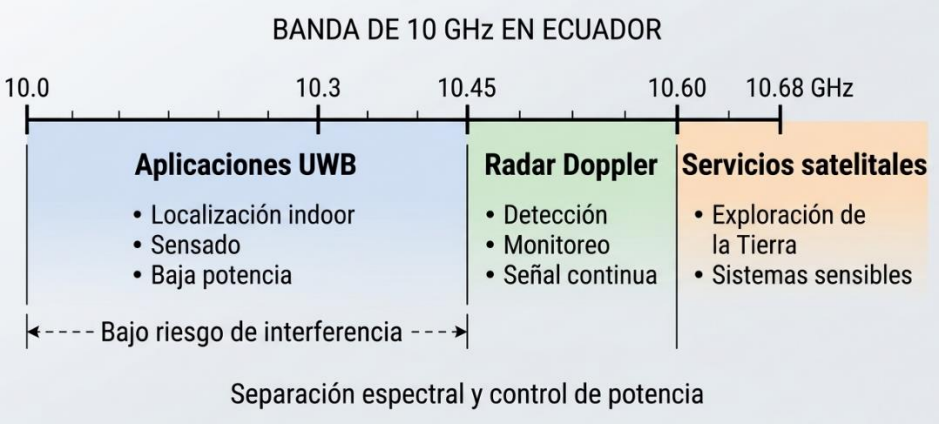
Sin embargo, dentro de la propuesta desarrollada en esta investigación, la mayoría de las aplicaciones se plantean para:

- interiores;
- espacios delimitados;
- y niveles moderados de EIRP.

Eso reduce considerablemente el alcance de emisiones no deseadas y facilita la coexistencia con otros sistemas ya presentes en el espectro como se evidencia en la **Figura 34**.

Figura 34.

Esquema referencial de coexistencia espectral dentro de la banda de 10 GHz



Fuente: Elaboración propia con base en (ARCOTEL, 2026; ETSI, 2024; Uit-r, 2018)

De manera general, el análisis muestra que sí existe viabilidad técnica para aplicaciones de corto alcance dentro de la banda de 10 GHz, siempre que se mantenga control sobre:

- potencia radiada;
- ocupación espectral;
- y separación básica entre tecnologías.

Además, el enfoque progresivo y experimental planteado en capítulos anteriores ayuda a disminuir riesgos de interferencia antes de pensar en despliegues de mayor escala.

4.3.2 Mecanismos de mitigación: Control de potencia y densidad espectral

Después de analizar los posibles escenarios de interferencia dentro de la banda de 10 GHz, también es importante revisar qué mecanismos pueden ayudar a reducir ese impacto durante la operación real de los sistemas. En este tipo de tecnologías, especialmente en aplicaciones de corto alcance, el control de potencia y de densidad espectral termina siendo uno de los elementos más importantes para lograr coexistencia con otros servicios.

El radar Doppler tiene un comportamiento diferente. Aunque también puede operar con potencias moderadas, sus señales suelen ser más continuas y concentradas en frecuencia. Por eso requiere un poco más de cuidado en aspectos como:

- emisiones fuera de banda;
- separación espectral;
- y control del alcance de cobertura.

En aplicaciones industriales o de monitoreo de corto alcance, esto normalmente se maneja limitando el área de operación y utilizando antenas con patrones más controlados.

La **Figura 35** resume de forma general cómo el control de potencia y la densidad espectral ayudan a reducir interferencias dentro de la banda.

Figura 35.

Relación entre potencia radiada y riesgo de interferencia



Fuente: Elaboración propia con base en (ARCOTEL, 2026; ETSI, 2024; Uit-r, 2018)

Otro aspecto importante es que muchas de las aplicaciones planteadas en esta investigación trabajarían en:

- interiores;
- campus;
- laboratorios;
- o espacios relativamente delimitados.

Eso facilita bastante el control de emisiones, ya que la señal no necesita propagarse largas distancias. Además, permite reutilizar frecuencias con menor riesgo de afectación hacia otros sistemas cercanos.

También se considera recomendable que las primeras implementaciones se desarrollen bajo esquemas experimentales o pilotos tecnológicos. Esto ayuda a medir niveles reales de interferencia y ajustar parámetros técnicos antes de pensar en despliegues más amplios.

En términos generales, el análisis muestra que la coexistencia dentro de la banda de 10 GHz sí puede manejarse de forma relativamente estable cuando existe:

- control de potencia;
- ocupación espectral razonable;
- y planificación básica del entorno de operación.

4.3.3 Criterios de protección para servicios existentes en la banda de 10 GHz

Además de controlar potencia y densidad espectral, también es necesario considerar ciertos criterios de protección para los servicios que ya utilizan segmentos de la banda de 10 GHz. En telecomunicaciones, a estos sistemas ya existentes normalmente se los conoce como servicios incumbentes, y cualquier nueva aplicación debe procurar convivir con ellos sin generar afectaciones importantes.

Dentro del contexto ecuatoriano, las atribuciones actuales incluyen principalmente servicios fijos, radiolocalización y algunos segmentos relacionados con aplicaciones satelitales. Por esa razón, las propuestas planteadas en esta investigación se orientan más hacia aplicaciones controladas y de corto alcance, evitando escenarios de ocupación masiva del espectro.

Uno de los primeros criterios considerados es la limitación de cobertura. La mayoría de las aplicaciones propuestas funcionan en áreas relativamente delimitadas. Esto ayuda a que las emisiones permanezcan dentro de la zona de operación y disminuye la probabilidad de afectar a otros sistemas cercanos.

También es importante mantener una separación adecuada entre aplicaciones que comparten la misma banda. Organizar los sistemas en segmentos diferenciados y definir parámetros de operación para cada uno reduce la posibilidad de interferencias y facilita la coexistencia entre distintos servicios.

Otro aspecto para tomar en cuenta es el control de emisiones fuera de banda. Tanto la UIT como ETSI mencionan que uno de los principales riesgos de compatibilidad aparece cuando parte de la energía transmitida termina desplazándose hacia frecuencias adyacentes utilizadas por otros servicios. Por eso, en aplicaciones experimentales o de corto alcance se recomienda trabajar con:

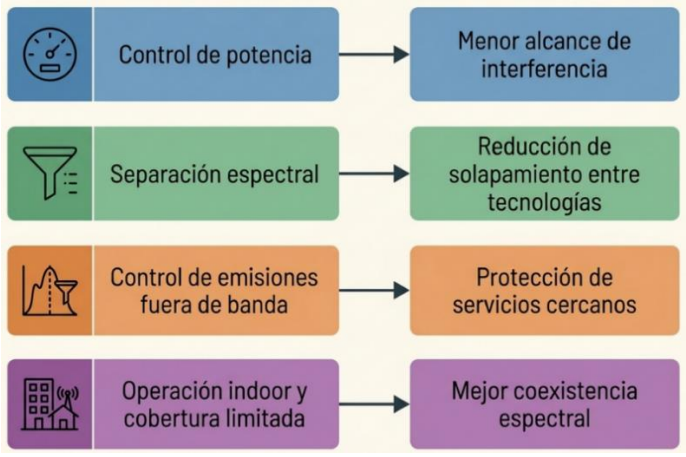
- niveles moderados de EIRP;
- filtrado adecuado;
- y parámetros de operación controlados.

En el caso de servicios satelitales, algunos sistemas de exploración de la Tierra y radiocomunicaciones espaciales trabajan con señales extremadamente débiles, por lo que incluso pequeñas interferencias podrían afectar su funcionamiento. Sin embargo, dentro de esta propuesta el riesgo disminuye porque no se plantea utilizar altas potencias ni coberturas extensas.

La **Figura 36** resume los principales criterios considerados para proteger servicios incumbentes dentro de la banda.

Figura 36.

Criterios básicos de protección espectral en la banda de 10 GHz



Fuente: Elaboración propia con base en (ARCOTEL, 2026; itu, 2026; UIT-R, 2006; Uit-r, 2018)

En general, los criterios planteados no buscan restringir completamente nuevas aplicaciones dentro de la banda, sino establecer condiciones mínimas que permitan un uso más ordenado del espectro. Además, trabajar inicialmente mediante pilotos tecnológicos y esquemas experimentales facilita evaluar el comportamiento real de estas tecnologías antes de pensar en implementaciones más amplias.

4.4 Arquitectura de Implementación Lógica

Después de revisar las condiciones técnicas, regulatorias y de coexistencia dentro de la banda de 10 GHz, el siguiente paso es organizar de forma general cómo podrían integrarse estas tecnologías dentro de un entorno real de operación.

La arquitectura propuesta se orienta principalmente a aplicaciones de corto alcance relacionadas con monitoreo, localización y sensado en espacios controlados. No se busca representar una implementación comercial definitiva, sino plantear una estructura lógica básica que permita visualizar cómo interactúan los distintos componentes del sistema.

La propuesta toma como referencia escenarios como: laboratorios, campus universitarios, entornos industriales y espacios indoor donde puedan implementarse soluciones basadas en UWB y radar Doppler.

Debido a que muchas de estas aplicaciones funcionan en distancias cortas y con niveles moderados de potencia, la arquitectura mantiene un enfoque relativamente simple y modular. Esto facilita futuras pruebas piloto, integración con infraestructura existente y posibles escenarios experimentales dentro del contexto ecuatoriano.

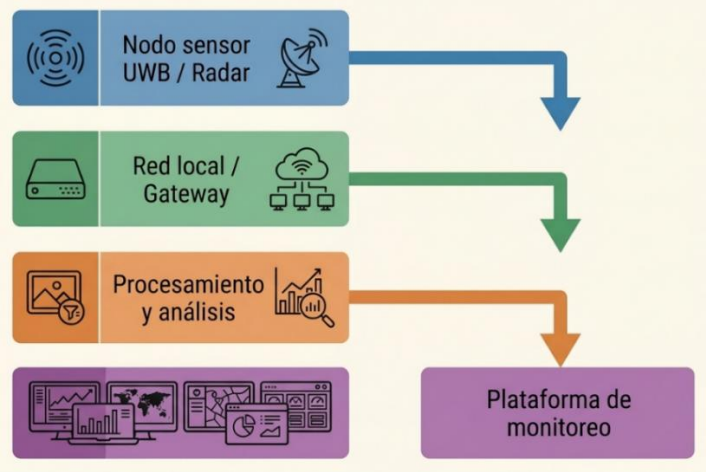
De forma general, la arquitectura propuesta se compone de cuatro niveles que trabajan de manera secuencial. El primero corresponde a los nodos sensores, encargados de captar la información mediante tecnología UWB o Radar Doppler. Estos datos se transmiten a través de una

red local hacia un gateway, desde donde pasan al módulo de procesamiento y análisis. Finalmente, la información procesada se presenta en una plataforma de monitoreo y administración, permitiendo al usuario consultar el estado del sistema y gestionar los eventos detectados.

En la **Figura 37** se visualiza la estructura lógica general planteada para esta propuesta.

Figura 37.

Flujo lógico de datos dentro de la arquitectura propuesta



Nota. elaboración propia

4.4.1 Flujo de datos y gestión dentro de la arquitectura propuesta

Una vez definida la arquitectura lógica general, también es necesario entender cómo circula la información dentro del sistema y cómo se administran los dispositivos conectados. En este caso, el flujo de datos comienza desde los nodos sensores ubicados dentro del entorno de operación y termina en la plataforma de monitoreo o gestión utilizada por el usuario.

Los nodos sensores corresponden principalmente a dispositivos UWB, radares Doppler y otros equipos compatibles con aplicaciones de corto alcance dentro de la banda de 10 GHz. Estos dispositivos son los encargados de captar información relacionada con: presencia, movimiento, localización, distancia o eventos específicos dentro del área monitoreada.

Luego de detectar la información, los datos son enviados hacia la red de comunicación interna. Dependiendo del entorno, esto puede realizarse mediante enlaces locales, gateways industriales o infraestructura Ethernet ya instalada dentro de la organización. Como la mayoría de aplicaciones planteadas son indoor o de cobertura limitada, no hace falta una red demasiado compleja para mantener comunicación estable entre dispositivos.

Después de la transmisión, la información llega a la capa de procesamiento. Aquí se realizan tareas básicas como:

- filtrado de datos;
- validación de eventos;
- almacenamiento;
- generación de alertas;
- o visualización en tiempo real.

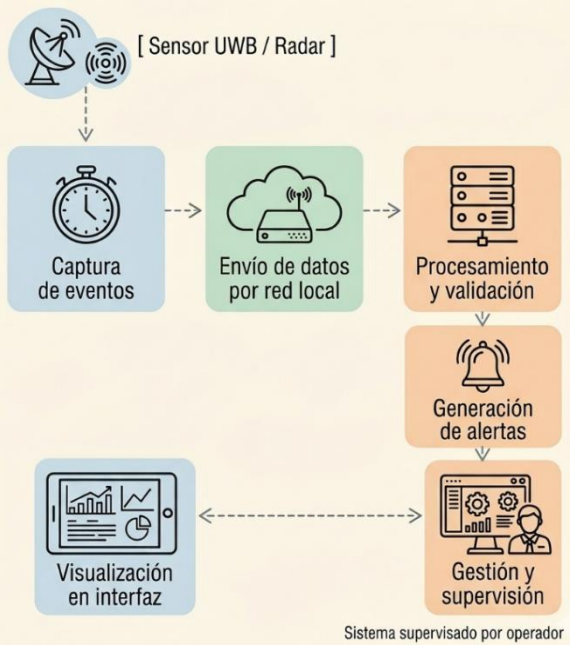
En implementaciones pequeñas o pilotos tecnológicos, este procesamiento podría ejecutarse desde un servidor local o incluso desde un computador de monitoreo. En escenarios más amplios también sería posible integrar plataformas edge o servicios en la nube para manejar mayor cantidad de dispositivos.

Finalmente, la información procesada llega a la interfaz de gestión, que corresponde al entorno desde donde el usuario supervisa el sistema. Desde esta interfaz se pueden revisar eventos detectados, estado de los sensores, alertas y parámetros básicos de operación.

La **Figura 38** muestra el flujo lógico de información planteado para esta propuesta.

Figura 38.

Flujo operativo de datos dentro del sistema



Nota. Elaboración propia

4.4.2 Protocolos de comunicación sugeridos para entornos industriales

Dentro de entornos industriales, la comunicación entre dispositivos necesita mantener estabilidad, tiempos de respuesta relativamente bajos y facilidad de integración con otros sistemas ya existentes. Por eso no todos los protocolos resultan igual de convenientes para aplicaciones basadas en UWB o radar Doppler.

En esta propuesta no se plantea un único protocolo obligatorio, sino varias opciones que se pueden adaptar dependiendo del tipo de aplicación, cantidad de dispositivos y complejidad del entorno. La idea es trabajar con tecnologías ya utilizadas en redes industriales e IoT, evitando arquitecturas demasiado complejas para etapas iniciales o pilotos tecnológicos.

Uno de los protocolos más utilizados actualmente en sistemas IoT y monitoreo es MQTT (MQTT, 2024). Su principal ventaja es que trabaja mediante mensajes ligeros y consume pocos recursos de red, algo importante cuando existen varios sensores transmitiendo información constantemente. Además, facilita bastante la comunicación entre dispositivos y plataformas de

monitoreo centralizadas (Aimacaña. Alex, 2025). Este protocolo suele utilizarse en proyectos de automatización y supervisión debido a su facilidad de integración con sensores, gateways y sistemas de gestión (Behnke & Austad, 2024).

Otra opción bastante práctica es TCP/IP sobre redes Ethernet industriales o redes LAN convencionales. Esto permite aprovechar infraestructura ya instalada dentro de universidades, industrias o laboratorios sin necesidad de implementar una red completamente nueva. En muchos proyectos académicos y entornos industriales, Ethernet sigue siendo una de las bases principales de comunicación por su estabilidad y compatibilidad con distintos equipos (ETSI, 2026).

En aplicaciones donde se requiera menor latencia, especialmente para detección rápida de eventos o monitoreo en tiempo real, también puede utilizarse UDP. Aunque no ofrece el mismo nivel de control que TCP, permite transmitir información más rápidamente, algo útil en ciertos escenarios de sensado y monitoreo continuo.

Para tareas de visualización y administración también se pueden utilizar protocolos HTTP o HTTPS, principalmente cuando el sistema incorpora interfaces web de monitoreo o acceso remoto desde navegadores. La **Tabla 11** resume algunos protocolos que podrían integrarse dentro de la arquitectura propuesta.

Tabla 11.

Resumen de protocolos que podrían integrarse dentro de la arquitectura propuesta

Protocolo	Uso principal	Ventaja dentro del sistema
MQTT	IoT y monitoreo	Bajo consumo de recursos
TCP/IP	Redes locales e industriales	Fácil integración
UDP	Eventos en tiempo real	Menor latencia
HTTP/HTTPS	Gestión y monitoreo web	Acceso desde navegador

Nota. Elaboración propia

En escenarios pequeños probablemente no sea necesario implementar arquitecturas industriales demasiado avanzadas. Con una red local estable y protocolos de comunicación como

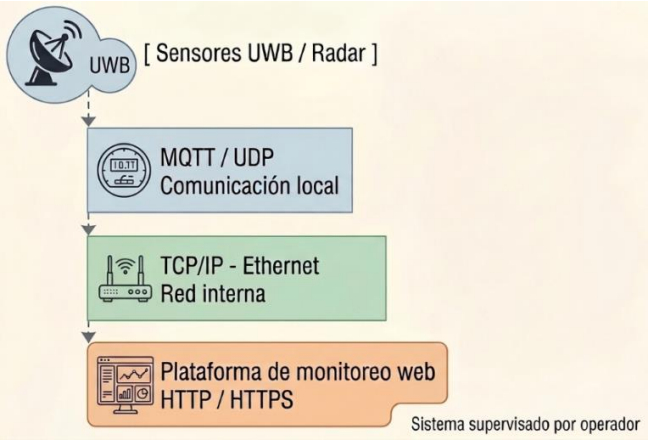
MQTT para el intercambio de datos o HTTP/HTTPS para la administración de la plataforma, es posible mantener una comunicación adecuada entre los sensores, el módulo de procesamiento y la interfaz de monitoreo.

Además, como la propuesta se orienta principalmente a aplicaciones *indoor* y de corto alcance, tampoco se espera manejar grandes volúmenes de tráfico ni coberturas extensas. Esto permite utilizar una arquitectura sencilla, fácil de administrar y con capacidad de crecer si en el futuro se incorporan nuevos sensores o puntos de monitoreo.

La **Figura 39** muestra de forma general cómo podrían integrarse los protocolos dentro de la arquitectura de comunicación propuesta.

Figura 39.

Integración de protocolos



Nota. Elaboración propia

4.5 Aplicaciones Prácticas y Escenarios de Despliegue

Luego de definir los aspectos técnicos y regulatorios de la propuesta, el siguiente paso es analizar cómo podrían aprovecharse estas tecnologías en situaciones reales. Más que plantear

soluciones para todos los sectores, el objetivo es identificar escenarios donde la banda de 10 GHz pueda aportar un beneficio claro y donde sus características técnicas representen una ventaja.

En este trabajo se consideran tres escenarios de referencia. El primero corresponde al sector industrial, donde Radar Doppler puede apoyar actividades de monitoreo y logística. El segundo se enfoca en aplicaciones de seguridad, especialmente para la detección de presencia y la protección de áreas específicas. Finalmente, se incluyen los entornos académicos, ya que representan espacios adecuados para realizar pruebas, validar nuevas aplicaciones y generar experiencia técnica antes de pensar en implementaciones a mayor escala.

La **Figura 40** resume los principales escenarios de despliegue considerados dentro de la propuesta.

Figura 40.

Escenarios de aplicación propuestos para la banda de 10GHz



Nota. Elaboración propia

En los siguientes apartados se describen algunos escenarios donde estas tecnologías podrían integrarse de forma relativamente viable dentro del contexto nacional.

4.5.1 Estado Industrial: Monitoreo y logística en el sector manufacturero

Uno de los escenarios donde la banda de 10 GHz podría tener aplicaciones más viables dentro del contexto ecuatoriano es el sector manufacturero, especialmente en actividades relacionadas con almacenamiento, monitoreo y logística interna. En Ecuador, gran parte de la industria manufacturera se concentra en áreas como procesamiento de alimentos, bebidas, productos de consumo, ensamblaje y manejo de bodegas, donde constantemente existe movimiento de materiales, equipos y personal.

Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), la manufactura continúa siendo una de las actividades industriales con mayor participación dentro de la economía nacional. Además, muchas empresas han comenzado a incorporar procesos de automatización, monitoreo y digitalización para mejorar control operativo y trazabilidad dentro de sus instalaciones.

En este tipo de entornos normalmente existen: líneas de producción, centros de almacenamiento, zonas de despacho y áreas restringidas, donde mantener control sobre movimiento de activos y monitoreo interno puede ayudar bastante en tareas operativas y logísticas.

Radar Doppler podría emplearse para tareas relacionadas con detección de presencia y monitoreo de movimiento dentro de determinadas zonas operativas. Esto puede resultar útil en: áreas restringidas, zonas de carga, accesos internos o espacios donde se requiera supervisión básica de actividad.

Una ventaja de estas aplicaciones es que permiten obtener información en tiempo real sobre lo que ocurre dentro de la planta, facilitando el seguimiento de activos, la supervisión de áreas de trabajo y la detección de eventos que puedan afectar la operación. Esto contribuye a mejorar la trazabilidad de los procesos y proporciona información útil para la toma de decisiones. En la **Tabla 12** se muestra algunos ejemplos de aplicación dentro del entorno industrial.

Tabla 12.

Ejemplos de aplicaciones dentro el entorno industrial

Área Industrial	**Posible aplicación**
Bodegas	Localización de activos
Líneas de producción	Monitoreo de movimiento
Áreas restringidas	Detección de presencia
Centros logísticos	Seguimiento interno de equipos

Nota. Elaboración propia

Además, este tipo de implementación podría desarrollarse inicialmente mediante pilotos tecnológicos pequeños, especialmente en universidades, laboratorios o industrias que ya cuenten con infraestructura de red básica. Esto ayudaría a evaluar el comportamiento real de las tecnologías antes de pensar en despliegues más amplios o aplicaciones comerciales.

El sector manufacturero representa uno de los escenarios más favorables para aplicaciones de corto alcance dentro de la banda de 10 GHz, principalmente porque combina: espacios controlados, necesidad de monitoreo y procesos donde la automatización y trazabilidad tienen cada vez mayor importancia.

4.5.2 Escenario de Seguridad: Detección de presencia y perímetros inteligentes

Otro escenario donde la banda de 10 GHz podría tener aplicaciones bastante útiles es el área de seguridad y monitoreo inteligente, especialmente en espacios donde se necesita detectar presencia, movimiento o accesos no autorizados dentro de zonas específicas.

En Ecuador, tanto instituciones públicas como privadas han incrementado el uso de sistemas de videovigilancia, monitoreo electrónico y control de accesos como parte de sus estrategias de seguridad. Además, con el crecimiento de proyectos relacionados con ciudades inteligentes, automatización y monitoreo institucional, también ha aumentado el interés por tecnologías que permitan mejorar supervisión y respuesta en tiempo real.

Según información del Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL), los procesos de transformación digital y adopción de tecnologías inteligentes forman parte de los ejes de modernización tecnológica impulsados en el país. Esto incluye sistemas de monitoreo, conectividad e integración tecnológica aplicados tanto a seguridad como automatización.

Dentro de este escenario, las tecnologías Radar Doppler pueden utilizarse para detectar movimiento o presencia dentro de áreas delimitadas.

Este tipo de soluciones podría implementarse en campus universitarios, laboratorios, bodegas, edificios institucionales, industrias o áreas restringidas. Por ejemplo, un sistema basado en Radar Doppler puede detectar el ingreso de una persona a una zona restringida y generar una alerta para que el personal revise lo que está ocurriendo. Si es necesario, esa información también puede complementarse con otros sistemas de monitoreo disponibles en la instalación.

La combinación de estas tecnologías permite contar con más información sobre lo que ocurre dentro de un área determinada sin depender únicamente de recorridos de inspección o

cámaras de vigilancia. Además, los eventos registrados pueden consultarse posteriormente para revisar incidentes o verificar el comportamiento del sistema. En la **Tabla 13** se presentan algunos escenarios donde estas tecnologías podrían implementarse.

Tabla 13.

Escenarios de seguridad propuestos

Escenarios	**Aplicación posible**
Campus universitarios	Monitoreo de accesos
Bodegas	Detección de movimiento
Industrias	Supervisión de zonas restringidas
Laboratorios	Control de presencia
Edificios institucionales	Alertas y monitoreo interno

Nota. Elaboración propia

La **Figura 41** muestra un ejemplo general de despliegue para monitoreo y seguridad inteligente.

Figura 41.

Escenario referencial de seguridad



Nota. elaboración propia

Este tipo de soluciones también puede integrarse con sistemas de videovigilancia, control de accesos o plataformas de monitoreo ya existentes dentro de las instituciones. De esa manera, la banda de 10 GHz no se plantea como un reemplazo total de otras tecnologías, sino como un complemento para tareas específicas de detección y supervisión en tiempo real.

Otra ventaja es que muchas de estas aplicaciones no requieren grandes velocidades de transmisión ni coberturas extensas. Lo más importante aquí es mantener estabilidad en la detección, tiempos de respuesta rápidos y capacidad de operar de forma continua dentro de espacios delimitados.

En escenarios como universidades, industrias o edificios institucionales, este tipo de tecnología podría ayudar a mejorar monitoreo interno, control de accesos y supervisión de zonas sensibles sin necesidad de implementar infraestructuras complejas.

4.5.3 Entornos académicos para investigación y validación tecnológica

Las universidades también pueden ser un buen lugar para probar este tipo de tecnologías antes de pensar en aplicaciones más grandes. Al tratarse de ambientes controlados, es posible realizar pruebas, cambiar configuraciones y evaluar el comportamiento de los equipos sin afectar procesos productivos o servicios reales.

En laboratorios de telecomunicaciones, electrónica o automatización Radar Doppler pueden utilizarse para desarrollar proyectos de investigación, trabajos de titulación o prácticas académicas. Por ejemplo, se podrían realizar pruebas de localización de equipos dentro de un laboratorio, analizar el alcance de la señal en diferentes espacios o desarrollar sistemas básicos para detectar movimiento y registrar eventos.

Además del aprendizaje que se obtiene en las prácticas, estas pruebas permiten conocer mejor cómo responde Radar Doppler en condiciones reales. Esa información puede servir para futuros proyectos de investigación o para que, más adelante, otras instituciones evalúen la posibilidad de incorporar este tipo de soluciones.

En la **Tabla 14** se presentan algunos ejemplos de aplicaciones que podrían desarrollarse en entornos académicos.

Tabla 14.

Posibles aplicaciones de la banda de 10 GHz en entornos académicos

Aplicación	**Tecnología**	**Ejemplo de Uso**
Prácticas de localización en interiores	UWB	Ubicación de equipos dentro de laboratorios.

Análisis de propagación de señales	UWB / Radar Doppler	Medición de cobertura y comportamiento de la señal en diferentes ambientes.
Desarrollo de sistemas de detección	Radar Doppler	Pruebas de detección de movimiento en accesos o laboratorios.
Proyectos de titulación e investigación	UWB / Radar Doppler	Desarrollo y validación de nuevas aplicaciones para monitoreo y sensado.

Nota. Elaboración propia

4.6 Viabilidad y Alineación con el Desarrollo Tecnológico Nacional

Más que analizar únicamente el funcionamiento técnico de la banda de 10 GHz, también es importante revisar si este tipo de propuesta realmente podría adaptarse al contexto tecnológico ecuatoriano. La viabilidad no depende solamente de la tecnología, sino también de factores como disponibilidad de infraestructura, costos, regulación y posibles escenarios de adopción.

Actualmente, Ecuador mantiene procesos de digitalización y modernización tecnológica en distintos sectores, aunque todavía existen limitaciones relacionadas con inversión, investigación aplicada y despliegue de tecnologías emergentes. Por esa razón, pensar en aplicaciones masivas sobre esta banda todavía sería poco realista. Sin embargo, sí existen escenarios específicos donde una implementación controlada podría tener sentido práctico.

La propuesta desarrollada en este trabajo se orienta justamente a ese tipo de entornos: aplicaciones puntuales, cobertura limitada y proyectos donde no sea necesario desplegar infraestructura compleja ni grandes niveles de potencia.

Además, el hecho de trabajar con soluciones de corto alcance permite reducir varios problemas asociados al uso intensivo del espectro, facilitando pruebas experimentales y posibles pilotos tecnológicos dentro de universidades, industrias o centros de investigación.

4.6.1 Evaluación técnica de la sostenibilidad del plan

La sostenibilidad del plan no depende solo del funcionamiento de la banda de 10 GHz, sino también de las condiciones tecnológicas reales que existen actualmente en el país. En Ecuador, los procesos de digitalización y automatización todavía avanzan de forma progresiva, especialmente fuera de los grandes centros urbanos e industriales. Aun así, durante los últimos años se ha observado un crecimiento importante en conectividad, adopción de plataformas digitales y modernización tecnológica dentro de distintos sectores productivos.

Según información del Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL) y organismos como CEPAL, Ecuador mantiene líneas de trabajo relacionadas con transformación digital, fortalecimiento de infraestructura tecnológica y desarrollo de servicios inteligentes. Aunque muchas de estas iniciativas todavía se encuentran en etapas de consolidación, sí generan un entorno más favorable para pruebas tecnológicas, automatización y proyectos relacionados con IoT y monitoreo inteligente (MINTEL, 2025).

Uno de los aspectos que favorece sostenibilidad dentro de la propuesta es que las aplicaciones planteadas no requieren cobertura nacional ni despliegues masivos de infraestructura. La mayoría de escenarios analizados funcionan en espacios relativamente delimitados, eso permite reutilizar parcialmente infraestructura ya existente, como redes LAN, servidores locales o plataformas básicas de monitoreo, reduciendo complejidad y costos de implementación.

Otro punto importante es que tecnologías como UWB y radar Doppler no están orientadas a reemplazar redes tradicionales de telecomunicaciones. Su función se relaciona más con sensado,

localización, monitoreo y detección dentro de espacios específicos. Por esa razón, los requerimientos operativos son mucho más manejables comparados con otros despliegues inalámbricos de gran cobertura.

Además, muchas de las aplicaciones propuestas trabajan mediante transmisión de eventos o intercambio puntual de información, evitando tráfico excesivo dentro de la red. Esto ayuda a mantener consumo moderado de recursos de comunicación y procesamiento, algo importante para entornos donde la infraestructura tecnológica todavía puede ser limitada.

Sin embargo, también existen factores que podrían dificultar una implementación más amplia. Actualmente, Ecuador todavía depende en gran parte de equipamiento tecnológico importado, especialmente en áreas relacionadas con sensores especializados, sistemas UWB y dispositivos avanzados de monitoreo. Esto puede incrementar costos de adquisición, mantenimiento y disponibilidad de repuestos.

A eso se suma que la oferta local de dispositivos compatibles con aplicaciones sobre la banda de 10 GHz sigue siendo reducida comparado con mercados tecnológicos más desarrollados. En muchos casos, las implementaciones iniciales probablemente dependerían de:

- equipos importados;
- kits de desarrollo;
- o soluciones experimentales utilizadas en investigación.

En la **Tabla 15** se resume algunos factores que influyen directamente en la sostenibilidad técnica de la propuesta.

Tabla 15.

Factores que influyen directamente en la sostenibilidad técnica de la propuesta

Factor evaluado	**Condición observada**
Infraestructura base	Parcialmente disponible
Integración con redes existentes	Viable

Cobertura requerida	Baja o moderada
Complejidad operativa	Media
Disponibilidad local de equipos	Limitada
Dependencia tecnológica externa	Alta
Viabilidad para pilotos tecnológicos	Favorable
Escalabilidad	Progresiva

Nota. Elaboración propia

A pesar de estas limitaciones, el análisis realizado muestra que sí existen condiciones para desarrollar aplicaciones experimentales y escenarios controlados dentro del país, especialmente en entornos académicos e industriales donde ya existe cierto nivel de infraestructura tecnológica y capacidad de investigación.

Más que pensar en despliegues masivos a corto plazo, la sostenibilidad de la propuesta se encuentra principalmente en aplicaciones específicas donde la banda pueda aportar ventajas reales en monitoreo, localización y sensado de corto alcance.

4.6.2 Alineación con la Política Pública de Transformación Digital y los lineamientos estratégicos del MINTEL

ES VIABLE POR TAL RAZON

La propuesta desarrollada en este trabajo tiene relación con varios lineamientos que actualmente se impulsan en Ecuador en temas de transformación digital, innovación y modernización tecnológica. Aunque la banda de 10 GHz no aparece mencionada directamente dentro de los planes nacionales, sí existen objetivos relacionados con tecnologías emergentes, automatización, IoT y digitalización que se conectan con las aplicaciones analizadas en este trabajo.

En los últimos años, el MINTEL ha impulsado estrategias orientadas a fortalecer infraestructura digital, conectividad y adopción tecnológica tanto en instituciones públicas como privadas. Dentro de estos lineamientos también se considera importante fomentar innovación, investigación aplicada y desarrollo tecnológico.

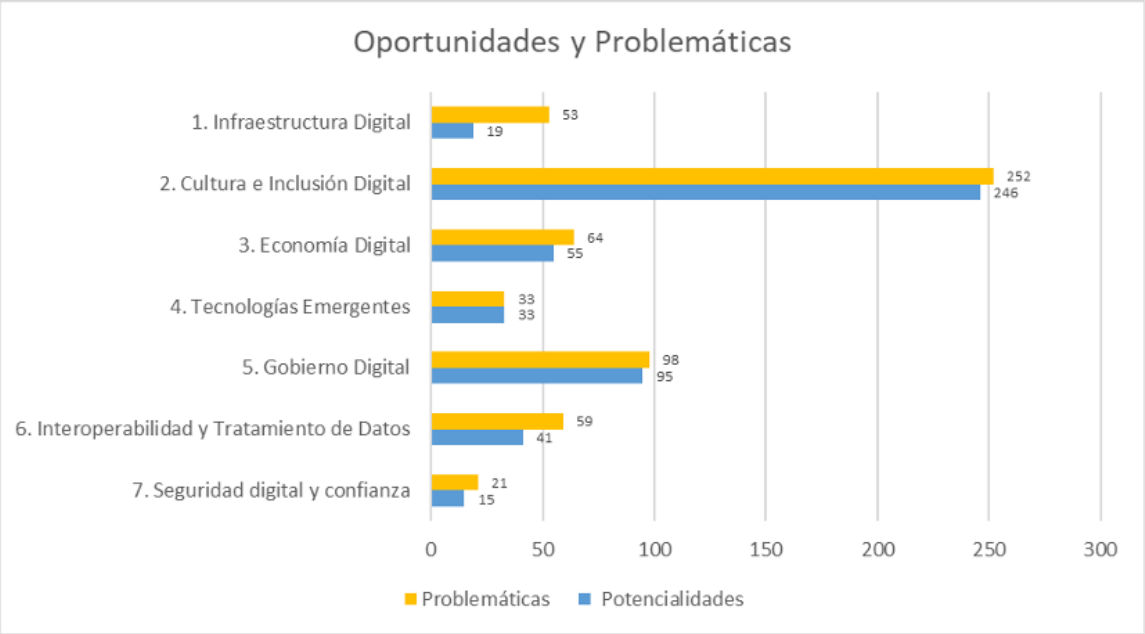
Aplicaciones relacionadas con monitoreo inteligente, sensado inalámbrico, localización indoor, automatización y sistemas de detección, pueden integrarse de forma coherente con varios de los objetivos planteados dentro de la Agenda de Transformación Digital del Ecuador.

Además, la propuesta presentada mantiene un enfoque progresivo, algo mucho más realista para el contexto nacional actual. Eso también coincide bastante con la forma en que actualmente se desarrollan muchos proyectos tecnológicos en universidades, laboratorios y centros de investigación del país.

La **Figura 42** muestra algunas de las principales oportunidades y problemáticas identificadas dentro del proceso de transformación digital en Ecuador. Entre los temas con mayor impacto aparecen cultura e inclusión digital, gobierno digital, interoperabilidad y tecnologías emergentes, aspectos que tienen relación directa con el desarrollo de nuevas aplicaciones inalámbricas y sistemas inteligentes.

Figura 42.

Oportunidades y problemáticas relacionadas con la transformación digital en Ecuador



Nota. (MINTEL, 2025)

Además, dentro de los lineamientos del MINTEL también se contempla el fortalecimiento de tecnologías emergentes aplicadas al sector productivo y al desarrollo sostenible. La **Figura 43** muestra parte de la matriz de metas e indicadores propuesta para este eje estratégico.

Un detalle importante es que varios indicadores todavía aparecen “por definir”, lo que demuestra que Ecuador aún se encuentra en una etapa de construcción y consolidación en temas relacionados con adopción de tecnologías emergentes. Precisamente por eso, propuestas enfocadas en pruebas técnicas, pilotos y aplicaciones controladas resultan más coherentes con la realidad tecnológica actual del país.

Figura 43

Matriz de metas e indicadores del eje de Tecnologías emergentes para el desarrollo sostenible

INDICADOR	LÍNEA BASE (2025)	META 2026	META 2027	META 2028	META 2029	META 2030	RESPONSABLE
Nivel de adopción de tecnologías nuevas y emergentes en la industria	Por definir	Por definir	Por definir	Por definir	Por definir	Por definir	MINTEL-Dirección de Fomento de Tecnologías Emergentes

Fuente: (MINTEL, 2025)

Otro punto importante es que la propuesta puede relacionarse con tendencias actuales como IoT e industria 4.0, especialmente en aplicaciones de monitoreo, logística y automatización básica. Esto permite que tecnologías como UWB y radar Doppler no queden solamente en el ámbito experimental, sino también como posibles herramientas de apoyo para procesos de supervisión y digitalización.

Sin embargo, el análisis también deja claro que todavía existen varios factores que pueden limitar una adopción más amplia, entre ellos:

- disponibilidad reducida de equipamiento especializado;
- dependencia tecnológica externa;
- costos de implementación;
- y necesidad de fortalecer capacidades técnicas dentro del país.

Por esa razón, el escenario más viable actualmente no sería una explotación masiva de la banda de 10 GHz, sino una incorporación progresiva orientada principalmente a: investigación, monitoreo especializado, automatización localizada y aplicaciones de corto alcance.

En forma general, la propuesta sí mantiene relación con varios procesos de modernización tecnológica impulsados actualmente en Ecuador, especialmente en áreas relacionadas con innovación, monitoreo inteligente y desarrollo experimental de nuevas tecnologías inalámbricas.

4.7 Síntesis Técnica del Plan de Explotación Propuesto

A lo largo de este capítulo se desarrolló una propuesta de explotación tecnológica para la banda de 10 GHz, considerando aspectos regulatorios, técnicos y operativos que permitan orientar una posible implementación dentro del contexto ecuatoriano.

En primer lugar, se analizaron los mecanismos de gestión y habilitación aplicables a este tipo de servicios, identificando las alternativas regulatorias que podrían utilizarse dependiendo del escenario de despliegue y del modelo de operación adoptado. Este análisis permitió establecer una referencia para futuras implementaciones y garantizar compatibilidad con la normativa vigente.

Posteriormente, se definió una propuesta de canalización para el segmento de trabajo comprendido entre 10,0 GHz y 10,4 GHz. Para ello se tomaron como referencia recomendaciones internacionales, características de propagación de la banda y requerimientos técnicos de las tecnologías evaluadas. Como resultado, se plantearon canales diferenciados para aplicaciones basadas en UWB y Radar Doppler, considerando sus necesidades de ancho de banda, capacidad de detección y condiciones de operación.

También se evaluaron parámetros relacionados con potencia radiada, límites de emisión y coexistencia espectral. Este análisis permitió identificar medidas de mitigación para poder reducir posibles interferencias con servicios existentes, especialmente en escenarios donde la banda comparta entorno radioeléctrico con otros sistemas de radiocomunicaciones.

Respecto a la arquitectura de implementación, se propuso un modelo lógico de comunicación que integra sensores, equipos terminales, plataformas de procesamiento y sistemas de gestión. La arquitectura planteada busca incorporar aplicaciones de monitoreo, automatización y detección dentro de entornos industriales o institucionales, utilizando protocolos ampliamente utilizados en sistemas IoT y automatización industrial.

Como parte de la validación conceptual de la propuesta, se analizaron dos escenarios de aplicación. El primero estuvo enfocado en monitoreo y logística para entornos manufactureros, mientras que el segundo abordó soluciones de seguridad basadas en detección de presencia y perímetros inteligentes. En ambos casos se pudo evidenciar que las tecnologías estudiadas pueden adaptarse a necesidades reales presentes en distintos sectores productivos del país.

Finalmente, se evaluó la viabilidad de la propuesta considerando las condiciones tecnológicas actuales del Ecuador y su alineación con las políticas nacionales de transformación digital. Los resultados muestran que las aplicaciones basadas en la banda de 10 GHz presentan mayor potencial en proyectos específicos de monitoreo, automatización y sensado inteligente que en despliegues masivos de telecomunicaciones. Además, se observó una relación favorable con los objetivos nacionales vinculados a innovación, tecnologías emergentes y fortalecimiento de capacidades digitales.

En conjunto, los elementos analizados permiten concluir que la banda de 10 GHz constituye una alternativa técnicamente viable para el desarrollo de aplicaciones innovadoras de corto alcance, siempre que su implementación considere criterios de planificación espectral, coexistencia con otros servicios y necesidades reales de los sectores donde se pretenda aplicar.

5 Conclusiones

La revisión de experiencias internacionales mostró que la banda de 10 GHz ya tiene aplicaciones en áreas como monitoreo, detección, localización y sistemas de radar de corto alcance. Estas experiencias demuestran que tecnologías como UWB y Radar Doppler pueden utilizarse en escenarios donde se requiere precisión, respuesta rápida y operación en tiempo real, características que también podrían aprovecharse en el contexto ecuatoriano.

Durante el estudio quedó claro que el aprovechamiento de esta banda no depende únicamente de la disponibilidad del espectro. También intervienen factores como la planificación de frecuencias, la coexistencia con otros servicios, la disponibilidad de equipos y las condiciones de operación de cada aplicación. Estos elementos deben considerarse desde las primeras etapas de cualquier proyecto que busque utilizar la banda de 10 GHz.

Como parte de esta investigación se desarrolló una propuesta de explotación tecnológica adaptada a la realidad nacional. La propuesta incluye criterios de canalización, parámetros operativos, mecanismos de coexistencia espectral y una arquitectura de referencia para aplicaciones basadas en UWB y Radar Doppler. Su propósito no es definir una implementación definitiva, sino servir como guía para futuras iniciativas relacionadas con esta banda.

Los escenarios estudiados muestran que el mayor potencial de uso se encuentra en aplicaciones específicas y no en servicios masivos de telecomunicaciones. Sectores como la industria, la logística, la seguridad y la automatización reúnen condiciones favorables para incorporar tecnologías de monitoreo, seguimiento y detección apoyadas en la banda de 10 GHz.

Las recomendaciones planteadas ofrecen una orientación técnica inicial para futuras implementaciones. Se incluyen criterios relacionados con canalización, potencia radiada, mitigación de interferencias, coexistencia espectral y posibles esquemas de operación dentro del

marco regulatorio ecuatoriano. Esto permite contar con un punto de partida para evaluar proyectos futuros de manera más ordenada y con menor incertidumbre técnica.

En términos generales, la banda de 10 GHz representa una oportunidad interesante para incorporar nuevas aplicaciones tecnológicas en el país. Sin embargo, antes de pensar en despliegues a gran escala, resulta más conveniente avanzar mediante pruebas controladas, proyectos piloto y entornos de investigación que permitan validar el comportamiento de las tecnologías propuestas bajo condiciones reales de operación.

6 Recomendaciones

La planificación de futuras aplicaciones sobre la banda de 10 GHz debería comenzar con proyectos piloto de alcance controlado. Esto permitiría obtener información real sobre cobertura, comportamiento de propagación, niveles de interferencia y desempeño de las tecnologías evaluadas antes de plantear implementaciones más amplias.

Resulta conveniente impulsar nuevas investigaciones relacionadas con UWB y Radar Doppler en condiciones propias del entorno ecuatoriano. Gran parte de la información disponible proviene de estudios desarrollados en otros países, por lo que contar con datos locales facilitaría la toma de decisiones técnicas y regulatorias en futuros proyectos.

Las pruebas experimentales deberían enfocarse inicialmente en sectores donde las necesidades tecnológicas son más evidentes, como la industria, la logística, la seguridad y la automatización. Estos entornos ofrecen condiciones adecuadas para validar aplicaciones de monitoreo, localización y detección utilizando la banda de 10 GHz.

También sería útil fortalecer la participación de universidades, centros de investigación y entidades relacionadas con la gestión del espectro radioeléctrico. El trabajo conjunto entre academia, sector productivo y organismos reguladores puede acelerar la generación de conocimiento técnico y la evaluación de nuevas alternativas de uso para esta banda.

En caso de plantearse futuras implementaciones, conviene mantener criterios de planificación espectral que prioricen la coexistencia con los servicios ya presentes en el entorno radioeléctrico. Aspectos como canalización, límites de potencia y control de emisiones deben formar parte de cualquier proceso de diseño desde sus etapas iniciales.

Finalmente, el aprovechamiento de la banda de 10 GHz debería abordarse de manera gradual. Antes de pensar en aplicaciones de gran escala, resulta más razonable consolidar experiencias de pequeña y mediana dimensión que permitan comprobar beneficios, limitaciones y requerimientos reales de operación dentro del contexto nacional.

Se considera que al operar con dispositivos como X7F202 es necesario proteger de luz solar directa o fuentes incandescentes intensas, por la sensibilidad óptica del encapsulado WLCSP del chip X7.

De referencia para pruebas considerar una altura de 1,5 a 2 m, aunque no es una exigencia del fabricante al momento de usar dispositivos, ya que puede instalarse en pared, techo, escritorio o embebido en un producto, siempre apuntando hacia la zona observada, evitando vibraciones, obstáculos metálicos y reflexiones intensas

7 Bibliografía

Aimacaña. Alex. (2025). *Evaluación de la Seguridad de los Sistemas de Comunicación en la Industria 4.0* [Universidad Politécnica Salesiana]. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/30556/1/UPS-CT012122.pdf

ARCOTEL. (n.d.). *Homologación: Equipos terminales que requieren homologación*. Retrieved May 21, 2026, from https://www.arcotel.gob.ec/homologacion-equipos-terminales-que-requieren-homologacion/?utm_source=chatgpt.com

ARCOTEL. (2021a). *PLAN NACIONAL DE FRECUENCIAS*. https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2021/10/PNF-V.6.0_14-07-21_v.1.pdf

ARCOTEL. (2021b). *PLAN NACIONAL DE FRECUENCIAS*. https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2021/10/PNF-V.6.0_14-07-21_v.1.pdf

ARCOTEL. (2025a). *Homologación: Requisitos para homologar un equipo terminal de telecomunicaciones – Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones*. https://www.arcotel.gob.ec/homologacion-requisitos-para-homologar-un-equipo-terminal-de-telecomunicaciones-2/?utm_source=chatgpt.com#video

ARCOTEL. (2025b). *Homologación: Requisitos para homologar un equipo terminal de telecomunicaciones – Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones*. https://www.arcotel.gob.ec/homologacion-requisitos-para-homologar-un-equipo-terminal-de-telecomunicaciones/?utm_source=chatgpt.com

ARCOTEL. (2025c). *Resolución Nro. ARCOTEL-CTHB-CTDE-2025-0324*.

ARCOTEL. (2026). *Plan Nacional de Frecuencias Ecuador 2026*. https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2026/03/anexo_1_res_03-02so-arcotel-2026_-1.pdf

Asamblea Nacional del Ecuador. (2023). *Reforma a la Ley Orgánica de Telecomunicaciones*. https://www.gobiernoelectronico.gob.ec/wp-content/uploads/2023/02/7e52b3d7-0ba5-4c58-a474-00e19fcbe127.pdf

Asamblea Nacional República del Ecuador. (2025). *Año I-Nº 59-12 páginas Quito, viernes 13 de junio de 2025 LEY ORGÁNICA REFORMATORIA A LA LEY ORGÁNICA DE TELECOMUNICACIONES.*

Behnke, I., & Austad, H. (2024). Real-Time Performance of Industrial IoT Communication Technologies: A Review. *IEEE Internet of Things Journal*, *11*(5), 7399–7410. https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3332507

Blanco, Y. (2022). *Herramienta Gráfica Para La Caracterización De Pérdidas y Cálculo de Coberturas en Radioenlaces* [Proyecto Fin de Grado]. Universidad Politécnica de Madrid.

Bole, A., Wall, A., & Norris, A. (2019). The Radar System – Technical Principles. *Radar and ARPA Manual*, 29–137. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097752-2.00002-7

Candal-Ventureira, D., González-Castaño, F. J., Gil-Castiñeira, F., & Fondo-Ferreiro, P. (2024). Coordinated Allocation of Radio Resources to Wi-Fi and Cellular Technologies in Shared Unlicensed Frequencies. *IEEE Access*, *9*, 134435–134456. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3115695

Catalano, A. (2025). *Colombia publicó el total de espectro disponible para IMT y llama a comentarios adicionales de cara a la CMR-27 – TeleSemana.com*. TeleSemana.Com. https://www.telesemana.com/blog/2024/09/27/colombia-publico-el-total-de-espectro-disponible-para-imt-y-llama-a-comentarios-adicionales-de-cara-a-la-cmr-27/

Climas del Ecuador. (2015). https://climasdeecuaador.blogspot.com/?m=0

Club de Radio Experimentadores. (2020). *ZONA DE FRESNEL* . https://crecj.org/zona-de-fresnel/

Comisión Interamericana de Telecomunicaciones. (2008). *El espectro radioeléctrico*. https://www.oas.org/en/citel/infocitel/2008/octubre/espectro_e.asp

ECO. (2026, July 16). *Sistema de información de frecuencia ECO*. European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT) / ECO. https://efis.cept.org/sitecontent.jsp?sitecontent=ecatable

Ente Nacional de Comunicaciones. (n.d.). *¿Qué es el espectro radioeléctrico?* Retrieved August 31, 2025, from https://www.enacom.gob.ar/-que-es-el-espectro-radioelectrico-_p117

Ericsson. (2024). *Ericsson Mobility Report Letter from the publisher*.

ETSI. (2024). *Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); Harmonised standard for access to radio spectrum; Part 3: UWB devices installed in motor and railway vehicles; Sub-part 1: Requirements for UWB devices for vehicular access systems within …*. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302000_302099/3020650301/03.02.00_30/en_3020650301v030200va.pdf?utm_source=chatgpt.com

ETSI. (2026). *Short Range Devices (SRD) using Ultra Wide Band technology (UWB); Harmonised standard for access to radio spectrum; Part 2: Ultra Wide Band location tracking devices; Sub-part 5: Requirements for enhanced indoor devices within 6,0 GHz to 8,5 GHz*. *1.1.1*(2026).

Farsaei, A., Ramachandra, G. K., Prasad Shantharam, S., Sheikh, A., Kumbul, U., El Soussi, M., Zhang, P., & Bhat, A. N. (2025). *An IEEE 802.15.4z/ab-Compatible IR-UWB MIMO Radar System for in-Cabin Monitoring*. 1–6. https://doi.org/10.1109/PIMRC62392.2025.11274911

FCC. (2002, February 13). *Application for Review of Certification of a Time Domain UWB Transmitter (Memorandum Opinion and Order)*. https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-03-28A1.pdf

FCC. (2026a, August 27). *47 CFR § 15.245 - Operation within the bands 902-928 MHz, 2405-2425 MHz, 5785-5815 MHz, 10500-10550 MHz, and 24075-24175 MHz*. Electronic Code of Federal Regulations (ECFR) / National Archives and Records Administration. https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-A/part-15/subpart-C/subject-group-ECFR2f2e5828339709e/section-15.245

FCC. (2026b, August 27). *47 CFR § 15.245 - Operation within the bands 902-928 MHz, 2405-2425 MHz, 5785-5815 MHz, 10500-10550 MHz, and 24075-24175 MHz*. Electronic Code of Federal Regulations (ECFR) / National Archives and Records Administration. https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-A/part-15/subpart-C/subject-group-ECFR2f2e5828339709e/section-15.245

FCC. (2026c, August 27). *eCFR :: 47 CFR 2.106 -- Tabla de asignación de frecuencias.* https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-A/part-2/subpart-B/section-2.106

GSMA. (2022). *Informe sobre precios del espectro en Ecuador*.

HENSOLDT. (2022). *HENSOLDT SPEXER ® 2000 3D MkIII Radar Ground-based air defence*. www.hensoldt.net

hyperphysics. (2024). *RADAR*. http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Sound/radar.html

INEC. (2024). *Tecnologías de la información y comunicación*.

Instituto Federal de Telecomunicaciones. (2017). *Tecnologías de Acceso Dinámico y Uso Compartido del Espectro*. www.ift.org.mx,

ITU. (1994). Recomendación UIT-R P.525-2: Cálculo de la atenuación en el espacio libre. *Recomendaciones Del UIT-R*, (P.525-2). https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-2-199408-I%21%21PDF-S.pdf

itu. (2026). *ULTRABANDA ANCHA (UWB)*. https://www.itu.int/itunews/manager/display.asp?lang=es&year=2004&issue=09&ipage=ultrawide&ext=html

ITU-R. (2024). *Reglamento de Radiocomunicaciones*. https://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2024/es

Llerena, J. (2023). *EVALUACIÓN DE LA ATENUACIÓN POR VEGETACIÓN DE UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA UTILIZANDO LA RECOMENDACIÓN ITU-R P.833-10 EN LA BANDA DE 1.8 GHZ PARA BOSQUES DE PINO, CIPRÉS Y EUCALIPTO EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA* [Proyecto de Investigación]. ESPOCH.

Martínez, B. (2019). *Diseño e implementación de un radar de onda continua (CW)* [Universidad de Zaragoza]. https://zaguan.unizar.es/record/85387/files/TAZ-TFG-2019-2081.pdf

MathWorks. (n.d.). *Estimación Doppler - MATLAB y Simulink*. MathWorks Documentation. Retrieved July 18, 2026, from https://la.mathworks.com/help/radar/ug/doppler-estimation.html?utm_source=chatgpt.com

Microwave Solutions Ltd. (2015). *MDU1750-C920802 | Addcom Solution Pte Ltd*. Microwave Solutions Ltd. https://addcom.com.sg/product/mdu1750-c920802/

MIIT. (2022, June 27). *Interim Provisions on Radio Management of Wireless Power Transmission (Charger) Equipment*. Ministry of Industry and Information Technology (MIIT) / Radio Management Bureau. https://wap.miit.gov.cn/gyhxxhb/jgsj/cyzcyfgs/bmgz/wxdl/art/2023/art_1e98823e689f42ca9ed14dcb6feec07a.html

Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información. (2022). *Agenda de Transformación Nacional*.

MINTEL. (2025). *Política Pública para la Transformación Digital del Ecuador* .

MQTT. (2024). *MQTT - The Standard for IoT Messaging*. https://mqtt.org/

Octopart. (2026). *DWM1000 de Qorvo - RF Transceiver Modules and Modems - Distribuidores, comparaciones de precios y fichas técnicas | Búsqueda de componentes de Octopart*. Octopart Inc. https://octopart.com/es/part/qorvo/DWM1000?gad_source=1&gad_campaignid=20635219167&gbraid=0AAAADZKcp_KKbCRrkEKU0qP6LSzMP9Ir&gclid=CjwKCAjwhZDUBhBGEiwAbi5bjnOgrmDvzujQvKJ7NE6w-K9yL_UZsyaGQEvtpPuXP0tZPZHuI1eCuRoCK0EQAvD_BwE

Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Objetivo 9 | Departamento de Asuntos Económicos y Sociales*. Objetivos de Desarrollo Sostenible – ONU. https://sdgs.un.org/goals/goal9

Presidencia de la República del Ecuador. (2021). *Reglamento General a la Ley Orgánica de Telecomunicaciones (Decreto Ejecutivo No. 126)*. https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2022/04/R.O._Decreto-Ejecutivo-126.pdf

Ribadeneira-Ramirez, J., Suarez, M., Sarmiento, E., & Santacruz Sulca, F. J. (2022). Propagación Indoor de 10 a 20 Ghz con Correcciones por Humedad y Concentración de Oxígeno para la Región Andina. *Revista Perspectivas*, *4*(2), 1–8. https://doi.org/10.47187/perspectivas.4.2.154

Rivera, C., Enrique, Z., Rodríguez, I., & Zaballos, A. G. (2020). *Estado actual de las telecomunicaciones y la banda ancha en Ecuador*. http://www.iadb.org

Rohde&Schwarz. (2021). *HIGH RATE PULSE ULTRAWIDEBAND PHYSICAL LAYER TESTING AND CERTIFICATION*. https://cdn.everythingrf.com/live/High_rate_pulse_UWB_physical_layer_testing_and_certif

ication_wp_en_3609_6841_52_v0100_637768106125596000.pdf?utm_source=chatgpt.com

Sangucho Simba, G. G. (2006). *ANÁLISIS PARA LA MIGRACIÓN DEL RADAR MSSR (RADAR DE VIGILANCIA SECUNDARIO MONOPULSO) A/C AL MODO S PARA LA DIRECCIÓN DE AVIACIÓN CIVIL EN LA CIUDAD DE QUITO* [ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL]. moz-extension://60eb672f-3203-4c79-b4a2-23fb99d712f4/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fbibdigital.epn.edu.ec%2Fbitstream%2F15000%2F506%2F1%2FCD-0460.pdf

Shirke, K., & Iyer, B. (2023). Through the wall human detection & surveillance sensor. *International Journal of System Assurance Engineering and Management 2023 14:1*, *14*(1), 569–574. https://doi.org/10.1007/S13198-022-01853-5

Silva, M., & Cartagena, J. J. (2021). *Diseño e implementación de un prototipo de radar de objetivos móviles con radio definida por software y GNURADIO* [Trabajo de titulación]. Universidad Politécnica Salesiana.

TarmaView. (2024). *Banda X* . https://www.tarmacview.com/es/glossary/x-band/?utm_source=chatgpt.com

UIT. (2021). Informe ITU-R SM.2093-4: Orientación sobre el marco reglamentario para la gestión nacional del espectro. *Unión Internacional de Telecomunicaciones*. http://www.itu.int/publ/R-REP/es

UIT. (2024). *Reglamento de Radiocomunicaciones: Artículos. Edición de 2024*. https://www.itu.int/en/publications/ITU-R/pages/publications.aspx?parent=R-REG-RR-2024&media=electronic

UIT-R. (2006). *RECOMENDACIÓN UIT-R SM.1755-0* - Características de la tecnología de ultrabanda ancha*.

Uit-r. (2018). *Datos de propagación necesarios para evaluar la interferencia entre estaciones en el espacio y estaciones sobre la superficie de la Tierra*. http://www.itu.int/publ/R-REC/es

Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2020). *Reglamento de Radiocomunicaciones*. https://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2024

UNIT ELECTRONICS. (2026). *HB100 Sensor de Movimiento Efecto Doppler*. UNIT Electronics. https://uelectronics.com/producto/hb100-sensor-de-movimiento-efecto-doppler/?srsltid=AfmBOopWWh3mgxMFlu9p68SUfJhzjso4mAyQL8SywbCdRJzUBYsKdlp4

Valpolini, P. (2020, April 22). *Hensoldt presenta su nuevo radar Spexer 2000 de tercera generación para la lucha contra sistemas aéreos no tripulados (C-UAS) y mucho más - Revista EDR*. https://www.edrmagazine.eu/hensoldt-unveils-its-new-spexer-2000-3rd-gen-radar-for-c-uas-and-not-only

WIPO. (2024). *Global Innovation Index 2024 Unlocking the Promise of Social g Entrepreneurship*. https://doi.org/10.34667/tind.50062

Wolff, C. (2022). *AN/SPS-55*. Radartutorial.Eu. https://www.radartutorial.eu/19.kartei/07.naval/karte018.en.html

Zebra Technologies. (2026). *Soluciones de Identificación, Captura de Datos y Localización en Tiempo Real*. Zebra Technologies Corp. https://www.zebra.com/la/es.html

Zhang, J. , Z. Y. , & W. J. (2024). *Estado de desarrollo de un sistema de iluminación inteligente en calles urbanas*. https://doi.org/10.1117/12.3024580

Zidar, J., Matić, T., Aleksi, I., & Hocenski, Ž. (2024). Dynamic Voltage and Frequency Scaling as a Method for Reducing Energy Consumption in Ultra-Low-Power Embedded Systems. *Electronics 2024, Vol. 13, Page 826*, *13*(5), 826. https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS13050826

8 Anexos

8.1 Fundamentos de Ingeniería

Longitud de Onda para la banda de 10 GHz

Este valor se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Donde:

λ: longitud de onda (m)

c: velocidad de la luz ($3x10^8\ m/s$)

f: frecuencia (HZ)

Considerando una frecuencia de 10 GHz, se obtiene:

$$\lambda = \frac{3x10^8}{10x10^9} = 0.03\ m$$

$$\lambda = 3\ \text{cm}$$

Pérdida de espacio libre

Para un enlace con línea de vista, la pérdida ideal de espacio libre se estima con:

$$\text{FSPL[dB]} = 92.45 + 20\cdot\log10(\text{f_GHz}) + 20\cdot\log10(\text{d_km})$$

Tabla 16

Cálculo del del espacio libre a 10 GHz

Distancia (km)	FSPL a 10.525 GHz (dB)	Cálculo (sustitución numérica)
0.1	92.89	$92.45 + 20\cdot\log_{10}(10.525) + 20\cdot\log_{10}(0.1) = 92.45 + 20.44 - 20.00 = 92.89$
1	112.89	$92.45 + 20\cdot\log_{10}(10.525) + 20\cdot\log_{10}(1) = 92.45 + 20.44 + 0.00 = 112.89$

5	126.87	$92.45 + 20\cdot\log_{10}(10.525) + 20\cdot\log_{10}(5) = 92.45 + 20.44 + 13.98 = 126.87$
10	132.89	$92.45 + 20\cdot\log_{10}(10.525) + 20\cdot\log_{10}(10) = 92.45 + 20.44 + 20.00 = 132.89$
20	138.92	$92.45 + 20\cdot\log_{10}(10.525) + 20\cdot\log_{10}(20) = 92.45 + 20.44 + 26.02 = 138.92$
50	146.87	$92.45 + 20\cdot\log_{10}(10.525) + 20\cdot\log_{10}(50) = 92.45 + 20.44 + 33.98 = 146.87$

La pérdida crece 6 dB cada vez que se duplica la distancia. En la práctica se añaden pérdidas por lluvia, gases, conectores, desalineación, polarización, radomo, vegetación, difracción, multipath y margen de disponibilidad. Para enlaces licenciados, la metodología de referencia es ITU-R P.530-19; P.676 trata gases y P.838 la atenuación específica por lluvia. [INT-02, INT-03, INT-04, INT-05]

Zona de Fresnel y despeje

Una trayectoria visual geométrica no garantiza un buen enlace. La primera zona de Fresnel debe mantenerse suficientemente despejada; una regla de ingeniería frecuente es proteger alrededor del 60 % del radio de la primera zona en el punto crítico.

Tabla 17

Cálculo de la zona fresnel

Trayecto total (km)	**Radio Fresnel en punto medio (m)**	**60 % de despeje (m)**	**Cálculo ($r_1 = \sqrt{(\lambda D/4)}$, $\lambda = 0.028484$ m)**
5	5.97	3.58	$r_1 = \sqrt{(0.028484 \times 5000 / 4)} = \sqrt{35.61} = 5.97$ m → $0.6 \times 5.97 = 3.58$ m
10	8.44	5.06	$r_1 = \sqrt{(0.028484 \times 10000 / 4)} = \sqrt{71.21} = 8.44$ m → $0.6 \times 8.44 = 5.06$ m
20	11.93	7.16	$r_1 = \sqrt{(0.028484 \times 20000 / 4)} = \sqrt{142.42} = 11.93$ m → $0.6 \times 11.93 = 7.16$ m

Ganancia de antena parabólica

Para una parábola idealizada, $G \approx \eta(\pi D/\lambda)^2$. Con eficiencia $\eta = 0{,}60$, el tamaño físico produce ganancias elevadas a 10 GHz.

Tabla 18

Cálculo de la ganancia para una antena parabólica

Diámetro (m)	Ganancia aproximada (dBi)	Cálculo ($G = \eta(\pi D/\lambda)^2$, $\eta = 0.60$, $\lambda = 0.028484$ m)
0.3	28.2	$G = 0.60 \times (\pi \times 0.3 / 0.028484)^2 = 0.60 \times 33.09^2 = 656.9 \rightarrow 10 \cdot \log_{10}(656.9) = 28.2$ dBi
0.6	34.2	$G = 0.60 \times (\pi \times 0.6 / 0.028484)^2 = 0.60 \times 66.18^2 = 2627.6 \rightarrow 10 \cdot \log_{10}(2627.6) = 34.2$ dBi
0.9	37.7	$G = 0.60 \times (\pi \times 0.9 / 0.028484)^2 = 0.60 \times 99.27^2 = 5912.1 \rightarrow 10 \cdot \log_{10}(5912.1) = 37.7$ dBi
1.2	40.2	$G = 0.60 \times (\pi \times 1.2 / 0.028484)^2 = 0.60 \times 132.36^2 = 10510.5 \rightarrow 10 \cdot \log_{10}(10510.5) = 40.2$ dBi

8.2 Codigo empleado para simulación de detección de velocidad con el módulo HB100

Figura 44

Ecuación del radar

```
771         PrG = cfg.EIRP_W*cfg.Gr.*(cfg.c./fcTime).^2 .* ...
772             sigmaTime.*pGround.^2*abs(gammaGround)^2 ./ ...
773             (((4*pi)^3).*Rg.^4.*cfg.systemLoss);
774
775         fdD = abs((2*fcTime/cfg.c).*(vx.*x./R));
776         fdG = abs((2*fcTime/cfg.c).*(vx.*x./Rg));
777
778         microIndex = rand*cfg.microDopplerIndexMax_rad;
779         microFreq = uniformLocal(cfg.microDopplerFreqMin_Hz, ...
780             cfg.microDopplerFreqMax_Hz);
781
782         phiD = 2*pi*cumsum(fdD)/fsActual + 2*pi*rand + ...
783             microIndex*sin(2*pi*microFreq*tPhysical+2*pi*rand);
784         phiG = 2*pi*cumsum(fdG)/fsActual + 2*pi*rand + ...
785             angle(gammaGround);
786
787         Ad = sqrt(2)*cfg.kIF*sqrt(max(PrD,0));
788         Ag = sqrt(2)*cfg.kIF*sqrt(max(PrG,0));
789
790         directTotal = directTotal + Ad.*cos(phiD);
```

Figura 45

Propagación de rayos usando el modelo SBR en Matlab

```
raysCell = raytrace(tx,rx,pm,Map=viewer,Type="pathloss");
rays = raysCell{1};
allRays{ip} = rays;


PL = [rays.PathLoss].';
phase = [rays.PhaseShift].';
delay = [rays.PropagationDelay].';
losVec = logical([rays.LineOfSight].');
```

Figura 46

Patrón de radiación

```
%% 4. PATRON HB100 APROXIMADO
    patternLossQuad_dB = 12*((deltaAz_deg/HPBW_AZ_deg)^2 + ...
                             (deltaEl_deg/HPBW_EL_deg)^2);

    patternLossDirect_dB = min(patternLossQuad_dB,PATTERN_CAP_dB);

    Grel_direct_lin = 10^(-patternLossDirect_dB/10);
```

Resultados de la simulación matemática de radar Doppler

Figura 47

Resultado del caso principal B6

Tabla 3. Resultado del caso principal B6

v real [km/h]	v estimada [km/h]	Ajuste constante [km/h]	P95 robusto [km/h]	Error [%]	RMSE ajuste [Hz]	Aceleración [m/s²]	STFT	Ganancia prog. [dB]	Clipping ADC [%]
60.000	59.932	60.000	64.368	-0.113	2.843	0.0024	LARGA	18.35	0.0608

Figura 48

Propagación SBR en posiciones representativas (B2)

Tabla 7. Propagación SBR en posiciones representativas (B2)

x [m]	Rayos	Pérdida dominante [dB]	Potencia coherente [dBm]	Potencia incoherente [dBm]	RMS delay spread [ns]	Excess delay [ns]	LOS
-50	58	86.87	-60.94	-67.58	1.204	31.60	1
-25	52	80.85	-55.62	-62.45	1.615	31.69	1
-10	39	73.00	-50.47	-55.55	2.802	25.44	1
0	26	58.81	-44.80	-43.29	2.661	39.13	1
10	37	84.08	-62.67	-63.49	5.978	37.63	0
20	14	94.26	-92.00	-75.29	3.110	25.02	0
30	19	99.91	-79.85	-79.97	3.062ya	399.64	0
40	19	102.51	-88.00	-83.00	3.054	400.82	0
50	16	104.34	-85.08	-86.58	3.284	400.83	0

Figura 49

Efecto del patrón direccional en posiciones representativas (B3)

Tabla 8. Efecto del patrón direccional en posiciones representativas (B3)

x [m]	Rayos	Significativos	Dentro de -3 dB	Efecto patrón [dB]	(Angulo de salida) AOD az. [°]	AOD el. [°]	Pérdida patrón dom. [dB]
-50	58	13	24	-4.44	177.74	0.10	1.06
-25	52	8	21	-4.42	175.47	0.20	0.90
-10	39	6	8	-5.14	168.76	0.50	0.57
0	26	5	0	-8.58	87.84	2.58	9.98
10	37	22	0	-25.98	44.13	0.36	25.61
20	14	11	0	-29.57	28.69	0.25	30.00
30	19	19	1	-23.92	28.69	0.17	30.00
40	19	19	3	-25.16	28.69	0.12	30.00
50	16	16	2	-29.43	28.69	0.10	30.00

Figura 50

Radar monostático ida-vuelta en posiciones representativas (B

Tabla 9. Radar monostático ida-vuelta en posiciones representativas (B4)						
x [m]	Rango geom. [m]	Rayos sig.	Pr SBR [dBm]	Pr espacio libre [dBm]	Factor multitrayecto [dB]	Pérdida patrón directa ideal [dB]
-50	49.96	13	-82.76	-97.84	15.08	1.06
-25	25.00	8	-72.08	-85.51	13.43	0.90
-10	10.12	6	-63.22	-69.12	5.90	0.57
0	1.98	5	-58.75	-59.58	0.83	9.98
10	10.27	22	-129.30	-128.24	-1.06	30.00
20	20.17	11	-195.14	-139.97	-55.17	30.00
30	30.14	19	-159.53	-146.95	-12.59	30.00
40	40.12	19	-178.32	-151.92	-26.40	30.00
50	50.11	16	-181.03	-155.78	-25.25	30.00

Figura 51

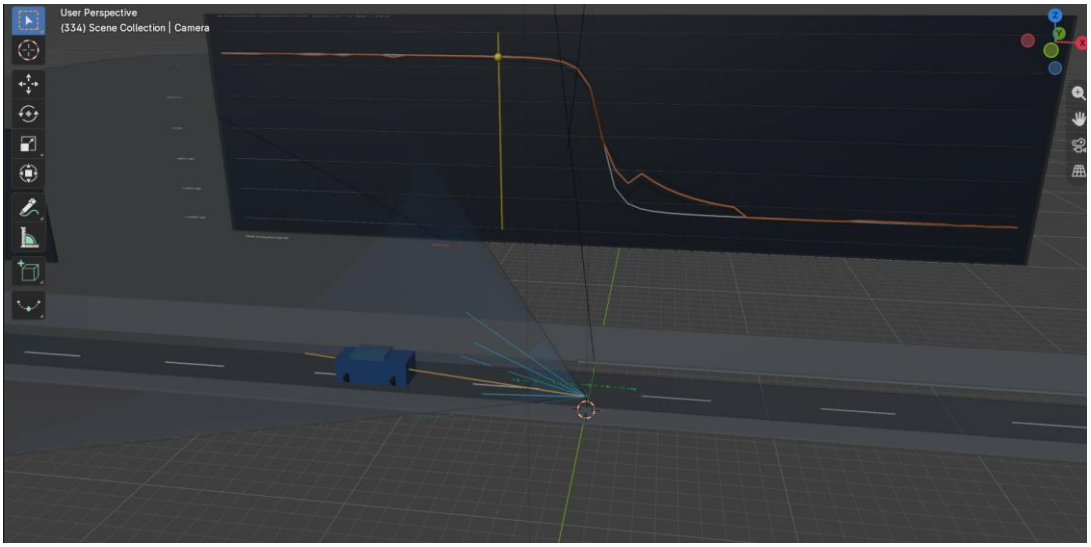
Validación Monte Carlo B6

Tabla 4. Validación Monte Carlo B6								
Trials	Detecciones	Pprobabilidad deteccion [%]	MAE [km/h]	RMSE [km/h]	Sesgo [km/h]	P95 |error| [km/h]	Máx. |error| [km/h]	Dentro de ±5 % [%]
100	100	100.00	0.137	0.168	-0.013	0.328	0.409	100.00

Renderizado de la animación en Blender

Figura 52

Animación de la simulación para el efecto doppler.



8.3 Codigo empleado para simulación de vigilancia y detección de objetivos con el dispositivo Safran Series 10 LPI CSR

Seha generado los archivos en Matlab y se encuentran en el siguiente enlace.

https://drive.google.com/drive/folders/1rA8wVdh2ZPLXGQPyI1XxFBMb4S3YgLHB?usp=sharing

El bloque de código comprendido entre las líneas 228 y 241 configura el procesamiento de rango y el sistema de detección del radar marítimo, donde se emplea un filtro adaptado para mejorar la identificación de los ecos recibidos y se implementa el detector GOCA-CFAR con las celdas de entrenamiento, celdas de protección y probabilidad de falsa alarma previamente establecidas, permitiendo calcular automáticamente un umbral adaptativo para diferenciar las señales generadas por posibles embarcaciones frente al clutter marino y al ruido presente en el escenario simulado

Figura 53

Procesamiento de la señal y detección adaptativa GOCA-CFAR en el radar marítimo de 10 GHz

```
228    % Procesador de rango basado en un filtro adaptado
229    rangeProcessor = phased.RangeResponse( ...
230        'RangeMethod','Matched filter', ...
231        'SampleRate',sampleRate);
232    % Obtiene los coeficientes del filtro adaptado
233    matchedFilter = getMatchedFilter(rdr.Waveform);
234    % Configura el detector adaptativo GOCA-CFAR
235    cfar = phased.CFARDetector( ...
236        'Method','GOCA', ...
237        'NumTrainingCells',cfarTrainingCells, ...
238        'NumGuardCells',cfarGuardCells, ...
239        'ThresholdFactor','Auto', ...
240        'ProbabilityFalseAlarm',cfarPfa, ...
241        'OutputFormat','CUT result', ...
242        'ThresholdOutputPort',true);
```